

Genealogie der Klangfarbe

**Abhandlung
zur Erlangung der Doktorwürde
der Philosophischen Fakultät
der Universität Zürich**

**vorgelegt von
Daniel Muzzulini
von
Zürich**

**Angenommen auf Antrag von
Herrn Prof. Dr. Ernst Lichtenhahn**

Basel 2004

**Wer Töne öffnet eurer Kerker Riegel?
Und wer entfesselt eure Ätherflügel?**

Karoline von Günderode

Für Katharina

Inhaltsverzeichnis

Einleitung.....	7
1. Grundlagen	12
1.1. Philosophische und ästhetische Grundlagen.....	13
1.1.1. Vincenzo Galileis Kritik an Zarlinos Konsonanzauffassung	13
1.1.2. Algebra vs. Geometrie / Pythagoras vs. Euklid.....	17
1.1.3. Rechtfertigung temperierter Stimmungen	18
1.1.4. Descartes' ästhetische Prinzipien	20
1.1.5. Die Monadenlehre von Leibniz	21
1.2. Von der Zahl zur Differenzialgleichung : Mathematik und Physik im 17. und 18. Jahrhundert	24
1.2.1. Beobachtung und Naturgesetz	24
1.2.2. Funktionen zur Modellierung der Welt	25
1.2.3. Spielformen der Unendlichkeit.....	27
1.2.4. Der Dimensionsbegriff	33
1.3. Mathematik und Schwingungslehre	35
1.3.1. Die Sinusschwingung und ihre Rolle als Ton	38
1.3.2. Mathematische Eigenschaften der Sinusschwingung.....	39
1.3.3. Sinusschwingung und Pendelschwingung.....	42
1.3.4. Das Theorem von Fourier in seiner Anwendung auf die Musik	43
Von Beeckman bis Seebeck	45
2. 17. Jahrhundert: Kaleidoskop und <i>harmonie universelle</i>	45
2.1. Definition des Tons	47
2.1.1. Vieldeutigkeit der Begriffe.....	48
2.1.2. Beeckman: <i>sonus</i> und <i>ictus</i>	48
2.1.3. Praetorius: Qualitative Erzeugung und quantitative Messbarkeit	50
2.1.4. Descartes: Musiktheorie, Physik und Wahrnehmung.....	51
2.1.5. Mersenne: schlagende und geschlagene Luft	55
2.1.6. Poisson : Kornfeldmetapher	57
2.2. Welle oder Teilchen? – Ausbreitung von Schall und Licht.....	58
2.2.1. Schallausbreitung im Vakuum.....	60
2.2.2. Schallteilchen und Atome.....	61
2.2.3. Konstanz der Schallgeschwindigkeit.....	61
2.3. Dimension: Raum der Töne, Dimensionen des Tons	63
2.3.1. Die drei Raumdimensionen und die Musik bei Praetorius	64
2.3.2. Die drei Raumdimensionen und die Musik bei Mersenne	67
2.3.3. Dimension und Sinneswahrnehmung bei Descartes.....	68
2.4. Obertöne: Vielheit in der Einheit.....	73
2.4.1. Praetorius	74
2.4.2. Beeckman	77
2.4.3. Descartes.....	80
2.4.4. Mersenne	83
2.4.5. Poisson.....	88
2.5. Resonanz.....	89
2.5.1. Descartes : Resonanz und Sympathie.....	89
2.5.2. Mersenne : Echo und Verfahren des Spektralvergleichs.....	90
2.5.3. Praetorius: Resonanz und Klangfarbe	91
2.5.4. Wallis: Resonanz und Schwingungsknoten.....	92
2.5.5. Du Verney: Resonanztheorie des Hörens	96

2.5.6.	Dodard: Singstimme und mehrfache Resonanz.....	97
2.6.	Schwebungen – Rauigkeit – Konsonanz	101
2.6.1.	Prateorius	102
2.6.2.	Mersenne	103
2.6.3.	Beeckman	104
2.7.	Klangqualität	108
2.7.1.	Praetorius	109
2.7.2.	Mersenne	109
3.	18. Jahrhundert: Kakophonie in der Einheit	112
3.1.	Definition des Tons und Superpositionsprinzip	113
3.1.1.	Sauveur: Knoten und Bäuche (1701).....	116
3.1.2.	De la Hire: Eigenschwingungen des Stabes (1716).....	118
3.1.3.	Rameau: Corps sonore und Son fondamental.....	120
3.1.4.	De Mairan: Resonanztheorie des Hörens (1737).....	133
3.1.5.	Daniel Bernoulli: Sinuston (1753/1764).....	135
3.1.6.	Euler: Die allgemeinste Saitengleichung (1748/1755).....	137
3.1.7.	Robert Smith: Periodizität der Saitenbewegung.....	140
3.1.8.	Tartini: Einheit in der Vielheit (1754).....	143
3.1.9.	Mattheson: Ton-Klänge (1748)	145
3.1.10.	Diderot: Tonhöhe, Lautstärke, Gleichförmigkeit (1748).....	147
3.1.11.	Rousseau: Tonhöhe, Lautstärke, Timbre (1768)	150
3.1.12.	Erxleben (1777)	152
3.2.	Ton und Geräusch	153
3.2.1.	Sauveur (1700)	153
3.2.2.	De Mairan (1720)	155
3.2.3.	Diderot (1748)	156
3.2.4.	Rousseau (1749)	158
3.2.5.	Smith: Schwebungen temperierter Intervalle (1749).....	160
3.2.6.	Sulzer (1774)	161
3.2.7.	Erxleben (1777)	163
3.3.	Timbre	164
3.3.1.	Rousseaus Definitionen	164
3.3.2.	Timbre im Artikel SON	167
3.3.3.	Tymbre und Vibrato im Artikel <i>VOIX</i> des Dictionnaire	169
3.3.4.	Eulers Erklärung der Klangqualitäten (1765).....	171
3.3.5.	Tonfarbe, eine frühe Belegstelle bei Herder (1768)	174
3.3.6.	Sulzer: Timbre = Ton? (1774).....	177
3.4.	Inharmonische Teiltöne	177
3.4.1.	Chladni (1787).....	178
4.	Das Wesen des Tons und das Aufscheinen der Klangfarbe	180
4.1.	Ton und Klang	183
4.1.1.	Chladni.....	183
4.1.2.	Koch 1802.....	185
4.1.3.	Ohm/Seebeck: Impulsschwingungen und trigonometrische Reihen	187
4.2.	Grenzen der Superposition	200
4.2.1.	Thomas Young 1800: Superposition und Schwebungen.....	200
4.2.2.	Hällström 1832: Kombinationstöne.....	203
4.2.3.	Ohm 1839: Kombinationstöne und Schwebungen	208
4.2.4.	Helmholtz: Differenz- und Summationstöne.....	210

4.3.	Zungenpfeifen und Vokale als Modelle des Tons	211
4.3.1.	Wilhelm Weber	211
4.3.2.	Willis 1832	214
4.4.	Klangfarbe – Tonfarbe	220
4.4.1.	Wackenroder (1799)	222
4.4.2.	Koch	223
4.4.3.	Jean Paul	224
4.4.4.	Chladni und Gottfried Weber	228
4.4.5.	Andersch 1829	229
4.4.6.	Berlioz und die Emanzipation der Klangfarbe	231
4.4.7.	Helmholtz zu Farbe und Ton	238
	Helmholtz und die Folgen	243
5.	Helmholtz' Klangfarbentheorie	245
5.1.	Ein Vorläufer: Brandt 1855	246
5.2.	Helmholtz 1857	252
5.3.	Ton, Klang, Klangfarbe	255
5.4.	Das Ohr als Frequenzanalysator	257
5.5.	Existenzstatus und Nachweis der Teiltöne	262
5.6.	Beweis des Ohmschen Gesetzes	263
5.7.	Der Ohm/Seebeck-Streit aus der Sicht von Helmholtz	265
5.8.	Die Tücken der Lautstärke	266
5.9.	Spektrale Charakterisierung von Klangfarbenattributen	268
5.10.	Dissonanz und Klangfarbe	275
5.11.	Ein- und Ausschwingvorgang, Spektraldynamik	278
6.	Die Phasenfrage	280
6.1.	Ohm – Seebeck	281
6.2.	Helmholtz	283
6.3.	Thomson (1877)	286
6.4.	Rudolph Koenig	290
6.5.	Hermann (1896)	304
6.6.	ter Kuile (1902)	305
6.7.	Beasley (1930)	306
6.8.	Chapin, Firestone (1937)	307
6.9.	Schouten (1938/1940/1941)	307
6.10.	Mathes & Miller (1947)	307
6.11.	Chocholle & Legoux (1957)	308
6.12.	Schouten, Ritsma, Cardozo (1962)	308
6.12.1.	Neuformulierung des Ohmschen Gesetzes	309
6.12.2.	Residualtöne im Lichte von Orts- und Zeittheorie der Frequenzverarbeitung	309
6.13.	Craig & Jeffress (1962)	311
6.14.	Plomp & Steneeken (1969), Plomp (1976)	312
6.15.	Pressnitzer, McAdams (1999)	313
7.	Klangfarbenräume	316
7.1.	Schönberg: Dimension und Klangfarbenmelodien	318
7.2.	Farbkreis und Klangfarbe bei Josef Hauer	321
7.3.	Mehrdimensionalität von Farbe und Klangfarbe bei Handschin	323
7.4.	Multidimensionale Skalierung	324
7.4.1.	Grey	325
7.4.2.	Parallelogrammbeziehungen im Klangfarbenraum	327
7.4.3.	Dimensionsbetrachtung	328

7.5.	Chowning (1973).....	331
7.5.1.	FM-Analyse?	332
7.6.	Lehrdahl: Timbral hierarchies (1987).....	333
7.7.	Oktavidentität im Klangfarbenraum?	335
8.	Spektralanalyse im 19. und 20. Jahrhundert.....	339
8.1.	Der Satz von Fourier für periodische Funktionen	340
8.2.	Inharmonische Teiltöne und quasiperiodische Funktionen	342
8.3.	Grenzen des Superpositionsgesetzes	343
8.4.	Verfahren der Spektralanalyse.....	345
8.4.1.	Fourieranalyse von Klängen im 19. Jahrhundert.....	348
8.4.2.	Die (kontinuierliche) Fouriertransformation	349
8.4.3.	Diskrete Fouriertransformation	351
8.4.4.	Wavelettransformationen.....	354
Anhang	357
[A]	Amplitudenspektrum der gezupften Saite in Abhängigkeit von der Zupfstelle	357
[B]	Amplitudenspektren der Impulsfunktionen nach Ohm [1843] in Abhängigkeit vom Verhältnis zwischen Impulsbreite und Periodizität	358
[C]	Periodische und quasiperiodischer Klänge.....	359
[D]	Zeitfunktionen quasiperiodischer Klänge.....	360
[E]	Mersenne und die Dimensionsfrage	361
Schlusswort	364
Literaturhinweise		366
Literaturverzeichnis		369
Personenverzeichnis.....		388
Sachindex.....		393
Abbildungsnachweise.....		399

Einleitung

Die Arbeit versteht sich als Beitrag an die theoriegeschichtliche Grundlagenforschung der abendländischen Musik. Das Thema ist in seiner Fokussierung auf den Begriff der Klangfarbe von Natur aus interdisziplinär, sowohl in den untersuchten Quellen als auch in der gewählten Behandlung. Nach Möglichkeit werden die einzelnen Disziplinen nicht auseinander dividiert. Ziel ist also nicht die Darstellung des gegenwärtigen Standes etwa der Psychoakustik, der Neurologie oder etwa die Besprechung gegenwärtiger Kompositionstechniken. Vielmehr soll der Wandel im Nachdenken über einen der zentralen musikalischen Grundbegriffe vor dem Hintergrund der sich entwickelnden Einzelwissenschaften ausgeleuchtet werden: der Ton in seiner klanglichen Erscheinung als Einheit in der Vielheit seiner Bestimmungsmerkmale. Johann Mattheson beklagt 1748 an der Wissenschaft von der Musik, dass sie nicht in der Lage sei, ihr „primum principium“ (die „Ton-Klänge“) zu definieren. Diese provozierende Behauptung hat bis heute eine gewisse Aktualität. Auch wenn nicht zu erwarten ist, dass neue psychoakustische Effekte entdeckt werden, gibt es im Zusammenhang mit der Tonhöhenverarbeitung oder dem Einfluss der Phasenrelationen auf die Klangempfindung noch immer offene Fragen. Eine abschliessende qualitative Charakterisierung der „Atome“ einer musikalischen Komposition ist bis heute nicht gegeben worden und kann auch nicht gegeben werden, da Schall als Informationsträger erst per Konvention Bedeutung erlangt; dies gilt ebenso für Sprache wie auch für Musik. Im Spannungsfeld von gesellschaftlichen Konventionen, von physikalischen und psychologischen Realitätsebenen bezieht das Thema immer wieder neue Anregungen.

Gegen Ende des 16. Jahrhunderts wächst zeitgleich zu einem schnellen Fortschritt in den Naturwissenschaften das Interesse an der Welt des Klingenden. Fortschritte in der Orgelbaukunst und die Erfindung hybrider Instrumente wie *Claviorganum* und *Geigen-Clavicymbel* zeugen von einer Experimentierlust mit Tönen, vergleichbar etwa mit derjenigen in den Anfängen der elektronischen Klangsynthese. Mit den Schriften von Praetorius und Mersenne stehen dann auch die ersten breitangelegten Versuche an, der Vielfalt der Musikinstrumente und ihres Tönens in ordnender Weise gerecht zu werden. Es scheint zweckmässig, den Zeitraum der Untersuchung von Primärquellen rückwärts mit dem Beginn des 17. Jahrhunderts zu begrenzen. Wenn man nach der Devise, allen themarelevanten Hinweisen nachzugehen, vorgehe, könnte man allerdings versucht sein, Aristoteles, Aristoxenos, Boethius und andere mit in die Untersuchung einzubeziehen. Dass explizite Rückbezüge in den Quellen des 17. Jahrhunderts meist nicht in die unmittelbare Vergangenheit weisen, sondern viel grössere Zeitspannen betreffen, ist ein weiterer Grund für die genannte Zäsur. Antikes Gedankengut ist also für das Dissertationsprojekt höchstens in seiner Rezeption themarelevant.

Weshalb werden die Erkenntnisse der verschiedenen beteiligten wissenschaftlichen Disziplinen, die zu bestimmten Zeitpunkten vorliegen, nicht oder in anderer Weise zu Theorien integriert, als dies die hypothetische Anwendung – früherer oder späterer – Perspektiven suggeriert? Wieso werden die letzten Schlussfolgerungen nicht gezogen, obschon ein Autor kurz vor der „Wahrheit“ steht? Liegt sein Erkenntnisinteresse anderswo oder stehen ihm nicht alle theoretisch verfügbaren Erkenntnisse tatsächlich zur Verfügung? Liegt ein schlichtes Kommunikationsdefizit vor oder ist mangelnde Analyse- und Synthesekompetenz dafür verantwortlich? Oder ist gar die nahe liegende, aber nicht gezogene Schlussfolgerung selbst nur Ausdruck einer divergierenden Lehrmeinung und somit alles andere als zwingend?

Zwei bemerkenswerte Beispiele metatheoretischer Überlegungen in den Primärquellen des 17. und 18. Jahrhunderts seien hier kurz vorweggenommen:

Marin Mersenne diskutiert in seiner *Harmonie universelle* von 1636 akustische Phänomene vor dem Hintergrund sowohl einer Korpuskel- als auch einer reinen Wellentheorie und erörtert die Einfachheit oder Schwierigkeit ihrer Deutung in der einen oder andern Sicht. Obschon er zu einer Wellentheorie zu neigen scheint, bezieht er nie explizit Stellung. Vermutlich gäbe er einer minimal spekulativen Theorie den Vorzug, wenn konkurrierende, erklärende Ansätze zur Auswahl stehen, und gewiss stimmte er Poppers Falsifizierbarkeit als „kill-Kriterium“ bei ...

Leonhard Euler spekuliert 1748 über die Darstellbarkeit periodischer Funktionen durch trigonometrische Reihen und zieht hypothetische Schlussfolgerungen bezüglich der Eleganz der Beweisführung und der daraus resultierenden Anschauungen, falls „Bernoullis Vermutung“ (das spätere Theorem von Fourier, 1822) nur zuträfe. Die Hypothese und ihre Konsequenzen werden von Euler primär aus rhetorischen Gründen in dieser Art dargelegt, um sie anhand eines Gegenbeispiels umso wirkungsvoller zu widerlegen. Das Gegenbeispiel kann erst unter Zuhilfenahme der Berechnungsformel für die Fourierkoeffizienten und unter Berücksichtigung von Dirichlets Präzisierung des Satzes von Fourier (1826) ins rechte Licht gesetzt werden. Es ist in der historischen Forschungsliteratur meines Wissens noch nie diskutiert worden. Exemplarisch lässt sich daran die Problematik der Grundannahmen der mathematischen Modellierung physikalischer Sachverhalte aufzeigen. Der Entscheid über die Richtigkeit des Gegenbeispiels kann via Annahmen über das Verhalten der Natur, ihrer Stetigkeit und Differenzierbarkeit, gefällt werden, oder es wird versucht, die Frage innerhalb der Mathematik selbst zu beantworten. In diesem zweiten Fall versteckt sich der Entscheid im Gleichheitsbegriff: Welche Eigenschaften der darstellenden und der darzustellenden Funktion müssen übereinstimmen, damit die beiden „gleich“ sind? [Kap. [3.1.5](#) - [3.1.6](#)]

Der französische Begriff *timbre* ist äusserst vieldeutig. Im Sinne einer allgemeinen Klangqualität ist er seit der Mitte des 18. Jahrhunderts nachweisbar. Im Deutschen hingegen setzt sich *Klangfarbe* erst Mitte 19. Jahrhundert durch, um den nach Abzug der „primären“ Eigenschaften Tonhöhe, Lautstärke und Dauer verbleibenden Rest eines Tons zu charakterisieren. Nicht nur diese negative Bestimmung, sondern auch die im Vergleich zu Fortschritten im Instrumentenbau und in der Instrumentierung abendländischer Musik späte Begriffsbildung und ihre im Deutschen einzigartige Verbindung von Hören und Sehen macht stutzig. Die Begriffsgeschichte ist noch wenig erforscht.

Die im Fokus dieser Arbeit stehenden „qualitativen“ Merkmale des Tons werden im Deutschen gewöhnlich mit dem vermutlich aus dem frühen 19. Jahrhundert stammenden Kunstwort *Klangfarbe* bezeichnet. Aus dieser Wortschöpfung ergibt sich im deutschen Sprachraum schier zwangsläufig eine Ausweitung der Fragestellung in den Bereich der Synästhesie, welche in den synonymen und sinnverwandten zeitgenössischen Begriffen des Englischen, Französischen, Italienischen und Lateinischen nicht angezeigt ist. Den Ursachen und Umständen der Wortbildung soll nachgegangen werden. Hingegen steht die Synästhesieproblematik nicht im Fokus. Von Interesse sind nur diejenigen Korrespondenztheorien, die Farbe mit Klangfarbe assoziieren. Die Wortverbindung „der gelbe Klang“ (Kandinsky) hat noch ein Jahrhundert nach dem Eindringen des Wortes Klangfarbe in die deutsche Sprache eine Sprengkraft, die sie aus einer schlichten Juxtaposition zweier Wörter aus unzweideutig andern Sinnesmodalitäten bezieht, und doch scheint sie nur die Klangfarbe beim Wort zu nehmen. Schon vor der Etablierung von Klangfarbe als deutsches Fachwort sind im englischen (Newton, Young) wie im französischen Sprachraum (Castel) Korrespondenzen zwischen Tönen und Farben aufgestellt worden, sie beziehen sich in der Regel auf Frequenzen (Spektralfarbe zu Tonhöhe), seltener

auf Intervalle (Spektralfarbe zu Intervall) oder auch auf Tonarten (Spektralfarbe zu Tonart). In Castels System (frühes 18. Jahrhundert) hatte ein „gelber Ton“ eine durchaus handfeste, aber von der Klangfarbe abweichende Bedeutung, nämlich die Tonigkeit *e*. Die Oktavlage bestimmt sich aus der Helligkeit (bei gleichem Farbton). Eine nicht diastematische Notenschrift ersetzt also, in Übereinstimmung mit Castels Auffassung, die Tonhöhendimension durch eine Farbkodierung. Diese Idee liegt seiner Farbenorgel zu Grunde. Demgegenüber liesse sich eine Kodierung der Klangfarbe durch Farben innerhalb diastematischer Notation durch Färbung der Noten realisieren, um etwa Wackenroders [1799] oder Hauers [1918] Auffassung zu visualisieren. Farbe, angewandt auf Töne, wird dabei zu einer Oberflächenbeschaffenheit der Töne im Raum von Zeiten, Dauern und Tonhöhen. Der Versuch, Kandinskys Wortspiel umzudrehen und klangcharakterisierende Adjektive in provozierender Weise auf die Farbe anzuwenden, misslingt fast immer. Die meisten solchen Adjektive lassen sich, ohne befremdlich zu wirken, mit Farbe und Licht kombinieren, oder sie stammen aus einer noch andern Sinnesmodalität. Am ehesten noch kommen onomatopoetische Adjektive wie *zischend*, *rasselnd* oder *klirrend* in Frage, weil schnelle Schwebungen und Intermittenzerscheinungen, die gewöhnlich mit ihnen assoziiert werden, trägheitsbedingt vom Sehsinn nicht in gleicher Art registriert werden wie vom Gehör: *der klirrende Lichtstrahl, der zischende Farbfleck, das rasselnde Grün*.

Eine vergleichbare systematische, quellengeschichtliche Erforschung der Klangtheorien über die gewählte Zeitspanne von der Entdeckung der Obertöne bis zur Gegenwart ist mir nicht bekannt. Es gibt zwar Untersuchungen zu einzelnen historischen Quellen und Zeitabschnitten oder zur Geschichte der Akustik, dabei ist das Augenmerk aber meist auf die physikalische Akustik gerichtet, das heisst auf denjenigen Teil der Schwingungslehre, der bis zu einem gewissen Grad über Ohr oder Auge verifizierbar ist. Zu erwähnen wären etwa die Untersuchung von Ullmann [1996], die Chladni in den Mittelpunkt stellt, oder diejenigen von Cannon, Dostrovsky [1981], [1987], welche die Entwicklung der Schwingungslehre im Zeitraum von 1600 bis 1750 zum Thema haben. Eine Ausnahme macht der Aufsatz von Békésy, Rosenblith [1948], der die Geschichte der frühen Hörtheorien aus physiologischer Sicht aufarbeitet. Die Klangfarbenwahrnehmung findet dabei aber keine Berücksichtigung. Eine knappe Zusammenfassung der Geschichte der Akustik, getrennt nach Schallerzeugung, Schallübertragung und Rezeption gibt Lindsay [Lindsay 1966]. Vor Kurzem erschienen ist Bailhache *Une histoire de l'acoustique musicale* [Bailhache 2001] mit Schwerpunkt im 17. Jahrhundert, das 20. Jahrhundert wird gerade mit 15 von 190 Seiten gewürdigt.

Die Kontroverse zwischen Ohm und Seebeck um 1840 und die Zeit seit Helmholtz ist weit besser dokumentiert, so zum Beispiel in Barkowsky [1996], Ullmann [1996] und Hesse [1972]. Barkowsky machte sich auch die Mühe, verschiedene historische psychoakustische Experimente mit Digitaltechnik nachzustellen. Leider ist ein Teil der Klangbeispiele, die dem Buch als Audio-CD beigelegt sind, nicht aussagekräftig, da die individuelle Phasencharakteristik der Wiedergabesysteme (Kopfhörer, Lautsprecher) durch sein Vorgehen prinzipiell nicht berücksichtigt wird.

Die Untersuchungen zur Klangfarbe am IRCAM in Paris – zu nennen sind insbesondere diejenigen der Gruppe „Perception et Cognition Musicales“ um Stephen McAdams – sind zwar zahlreich und institutionell verankert, aber nicht historiographisch ausgerichtet, was die Sichtung der Aufsatzsammlung *le timbre, métaphore pour la composition* [Timbre 1991] aufzeigt. Die aktuellen Aufsätze des IRCAM werden regelmässig auch im Internet publiziert (www.ircam.fr). Die Arbeiten Reuters zur Physik und Psychoakustik des Einschwingvorgangs

[1995] und zur „auditiven Diskrimination von Orchesterinstrumenten“ [1996] reflektieren den aktuellen Stand der Forschung zu diesen Spezialaspekten der Klangwahrnehmung. Eine Liste von Definitionen zu Timbre/Klangfarbe wurde von Gregg Sandell im Internet publiziert [Sandell www]. Man vergleiche dazu die Diskussionsbeiträge des Autors [Muzzulini, 2001] und von Peter Jost [2001] in der Zeitschrift „Musiktheorie“. Im Bereich der Synästhesie, nämlich zum Thema der „wechselseitigen Beziehungen zwischen Ton und Farbe“ liegt eine umfangreiche neuere „kulturgeschichtliche“ Studie von Jörg Jewansky [1999] vor, die den Zeitraum von Aristoteles bis Goethe abdeckt und auf ähnliche Weise wie die vorliegende Arbeit intensives Quellenstudium betreibt.

Schon in den Quellen wird das Thema interdisziplinär behandelt. Die beteiligten Fächer sind in moderner Terminologie Musikwissenschaft, Mathematik, Physik, Elektrotechnik, Psychologie, Neurologie, Linguistik, Philosophie und Ästhetik. Diese Disziplinen werden je nach Autor, historischem Kontext und Erkenntnisinteresse anders gewichtet. Die Autoren kommen in Form von Zitaten ausführlich selbst zu Wort, die Interpretation der Textstellen schreckt aber vor anachronistischer Betrachtungsweise nicht zurück. Es ist Methode, die Aussagen in die Terminologie und Denkweise einer andern Zeit zu transponieren und mit deren „Wissen“ zu konfrontieren. Cannon, Dostrovsky [1981] verwenden im Zusammenhang mit der Lektüre historischer akustisch-physikalischer Texte zur Schwingungslehre die moderne Mathematik als Metasprache der vergleichenden Interpretation. Soweit soll hier, nicht nur aus Rücksicht auf das Zielpublikum, nicht gegangen werden. Denn die Möglichkeit einer inadäquaten Verabsolutierung besteht trotz des vermeintlich objektiven Charakters der Mathematik.

Die gewählte Methode der vergleichenden Textlektüre auf Basis von Originalzitaten versucht vielmehr, die Texte aus sich selbst zu erklären. Fremdsprachige Zitate in den Originalquellen werden immer auch übersetzt und in zweispaltigem Layout wiedergegeben. Nur selten kann dabei auf bestehende Übersetzungen zurückgegriffen werden. Bereits die Übersetzung ist Teil des Interpretationsvorgangs. Dies trifft insbesondere auch die zentralen Begriffe, für die es keine 1:1-Entsprechung im Deutschen gibt. So stellen die französischen Begriffe *timbre*, *son*, *bruit*, *grave*, *aigu*, *aigre* je nach zeitlichem und thematischem Kontext unterschiedliche Anforderungen bei ihrer Übertragung ins Deutsche.

Die Einteilung des umfangreichen Quellenmaterials bis 1850 erfolgt auf oberster Stufe durch eine zeitliche Einteilung in drei Gruppen, das 17., das 18. und die erste Hälfte des 19. Jahrhunderts. Innerhalb dieser Zeiträume wird eine Aufgliederung nach systematischen Aspekten vorgenommen. Das heisst eine gegebene Quelle kann in verschiedenen Unterkapiteln aus jeweils wechselnder Perspektive beleuchtet werden. Die Gliederungsaspekte variieren zwischen den verschiedenen Quellengruppen: Beispielsweise ist die Natur der Schallübertragung als Welle oder als Teilchen im 19. Jahrhundert kaum ein Thema, die Kombinationstöne werden erst in der Mitte des 18. Jahrhunderts Diskussionsgegenstand, und sie spielen in Zusammenhang mit der Klangfarbe im 20. Jahrhundert, wo ihr Existenzstatus in der Cochlea geklärt ist, nur noch eine indirekte Rolle. Die Gliederung der Arbeit ergibt sich somit primär aus dem Quellenmaterial selbst. Die Methode, die Autoren selbst ausführlich sprechen zu lassen, suggeriert zwar eine gewisse Authentizität, es soll dabei aber nicht übersehen werden, dass die Wahl der Autoren und Passagen immer schon auch eine Interpretation und Bewertung ist. Die Vielzahl der berücksichtigten Quellen erlaubt es nicht, jedem Hinweis nachzugehen. Solche Hinweise können aber als Ansporn für zukünftige Forschung verstanden werden.

Dieses quellenbasierte Vorgehen ist bis um etwa 1850 sinnvoll. Mit dem Forschungsbeitrag von Helmholtz drängt sich ein modifiziertes Vorgehen auf. Einerseits sind in fast allen relevanten Texten zur Psychoakustik Helmholtz-Bezüge nachweisbar und andererseits steht neben der eigentlichen psychoakustischen Literatur zum Thema eine Fülle von Beiträgen seitens der Kompositionstheorie, Linguistik, Phonetik und Musikpsychologie zur Auswahl, was im Anschluss an die Darstellung von Helmholtz' Position eine Eingrenzung des Blickwinkels auf zwei wesentliche Spezialaspekte, die Phasenproblematik und die Klangfarbenräume, rechtfertigt. In der Regel kann dabei auf Quellenlektüren und Übersetzungen verzichtet werden, da die Texte leichter greifbar sind und ihre Sprache weniger zu Missverständnissen Anlass gibt.

Die Quellenaufarbeitung wird von Grundlagenkapiteln umrahmt, in denen neben den ästhetischen Grundpositionen die Geschichte der relevanten Mathematik thematisiert wird. Diese Kapitel sind freier gestaltet und beziehen sich im Unterschied zum Hauptteil vermehrt auch auf Sekundärliteratur. Darüber hinaus werden die mathematisch physikalischen Grundlagen so weit als möglich auch innerhalb der Quellenlektüre erarbeitet. Eine gewisse Redundanz ist dabei unvermeidlich und auch beabsichtigt, denn auch die theoretischen Betrachtungen sollen für sich gelesen werden können.

Das zweite der Grundlagenkapitel [Kap. 8] ist wegen der vorgestellten mathematischen Theorien und Verfahren das Schwierigste. Insgesamt wurde versucht das geisteswissenschaftlich orientierte Zielpublikum nicht aus den Augen zu verlieren. Dies ist mitunter nur unter starker Vereinfachung zu erreichen. Für eine mathematische Vertiefung sei deshalb auf die entsprechende Fachliteratur verwiesen.

Mein Dank geht in erster Linie an Prof. Dr. Ernst Lichtenhahn (Universität Zürich), der mich durch diese Arbeit begleitet hat. Die Nachmittagsgespräche mit ihm werden mir unvergessen bleiben. PD Dr. Dorothea Baumann (Universität Zürich) hat mir in der letzten Phase mit zahlreichen Anregungen und Literaturhinweisen weiter geholfen. Dr. Alain Cernuschi (Université de Lausanne) gab mir nützliche Hinweise zu Rousseau und zur Encyclopédie [Kap. 3.3]. Zahlreiche sehr anregende Gespräche zu sprachwissenschaftlichen und philosophischen Themen durfte ich mit Prof. Dr. Wolfram Groddeck auf Tinos und in Basel führen. Auch ihm verdanke ich wertvolle Literaturhinweise. Stephen Mc Adams (IRCAM) gewährte mir 1991 ein Interview und hat mich mit aktuellen Aufsätzen zu den Kapiteln 6 (Phasenproblematik) und 7 (*timbre spaces*) versorgt. Seine Anregungen waren für diese Kapitel wichtig. Gerald Bennett (Schweiz. Computermusik-Zentrum, Musikhochschule Zürich) demonstrierte mir die Möglichkeiten von C-Sound und diskutierte mit mir eine Vorfassung „Das Ohmsche Gesetz der Akustik“ zu Kapitel 6. Diese entstand 1998 am Institut für Informatik der FHBB. Bei der Durchführung eines zugehörigen Versuchs halfen mir Prof. Hans-Peter Häusler (FHBB), Hanspeter Hunziker und Michael d'Souza (alle Elektroingenieure). Michael diskutierte mit mir auch die Durchführung zukünftiger Phasenversuche und ist immer für Gespräche zu meinen Themen zu haben. Prof. Heinz Martin (FHBB) ermöglichte mir einen Vortrag zum Thema *Töne und Farben*. Dieser stand am Anfang meiner erneuten Beschäftigung mit dem Thema der Klangfarben. Ihnen und allen hier Ungenannten, die mich dazu bewogen haben, am Ball zu bleiben, sei hier ganz herzlich gedankt.

1. Grundlagen

Niemand klassifiziert so gern als der Mensch [Jean Paul, Vorschule der Aesthetik, 1804]

Die Interpretation von Schallvorgängen und überhaupt allgemeiner Prozesse als Objekte – Objekte der Physik oder Objekte der Wahrnehmung – stellt ein spannendes Moment menschlichen Denkens im Umfeld von Abstraktion und Klassifikation dar. Die mathematische Durchdringung der Wissenschaften und Künste, das schonungslose Hinterfragen antiker Wahrheiten, die Ablösung einer statischen zahlenorientierten durch eine dynamische, funktions- und prozessorientierte Mathematik, das Aufkommen der induktiven Methode zur Beschreibung von Naturgesetzen mittels einfacher algebraischer Zusammenhänge, die im Makro- wie im Mikrokosmos gelten [Jewanski, 142], sind zentrale Momente, welche die Aufbruchsstimmung zu Beginn des 17. Jahrhunderts kennzeichnen. In der zweiten Hälfte des Jahrhunderts etablieren sich die wissenschaftlichen Gesellschaften in Italien (Accademia del Cimento 1650-er Jahre), England (Royal Society 1662), Frankreich (Académie des Sciences 1667), Deutschland (Academia Naturae Curiosorum 1652, Berlin 1700) mit naturwissenschaftlicher Ausrichtung. Vorläuferinnen, hauptsächlich in Italien, sind die humanistischen Akademien des 15. und Sprachgesellschaften des 16. Jahrhunderts. Dadurch erlangt der kommunikative Aspekt der Internationalisierung des Wissens und der Wissenschaft frei von theologischen Beschränkungen [Helferich, 119-120, Pfeiffer et al., 31] zunehmend Bedeutung. Legitimiert durch die Obrigkeit genossen sie eine hohe Anerkennung. Die von ihnen herausgegebenen Periodika wie die *Royal Transactions* und die *Histoire & Mémoires de l'Académie Royale des Sciences* werden zu wichtigen internationalen Foren und sind für die Historiographie der Naturwissenschaften von grossem Wert. An der Geschichte des Klangbegriffs lässt sich der Wandel abendländischen Denkens exemplarisch nachzeichnen. Die Lehre von den Tönen, deren Gegenstand unsichtbare Bewegungen sind, ist ein faszinierendes Forschungsthema und verschafft Zugang zu Einsichten aus den verschiedensten Wissensgebieten. Es geht dabei um die Entstehung und Bedeutungsverschiebungen wissenschaftlicher Begriffe, um den Wandel im physikalischen, medizinischen und psychoakustischen Wissen vor dem Hintergrund des musikalischen und musiktheoretischen Denkens, und immer wieder um die dazu angeforderte Mathematik und ihre Interdependenzen.

Kap. [1.1](#) skizziert die Auseinandersetzung im ausgehenden 16. Jahrhundert um Konsonanzbegriff und Tonsystem und bezieht diese auf antike Positionen. Die beiden Positionen der kontinuierlichen (Euklid) und der diskreten Weltsicht (Pythagoras) erlangen in jüngster Vergangenheit erneut Aktualität: Die klassische Analysis als kontinuierliche Theorie und die diskrete Mathematik mit ihren rechnergestützten Berechnungsverfahren. Oder in der Musikaufzeichnung und Wiedergabe das Ersetzen von analogen durch digitale Speichermedien und digitale Elemente der Übertragungskette.

Kap. [1.2](#) thematisiert die Verwandlung der Mathematik von der Proportionenlehre antiker Prägung hin zu einer dynamischen Theorie, deren Objekte Prozesse sind. In diesem Zusammenhang ist der vielfältige Umgang mit dem Unendlichen sowie der Dimensionsbegriff von grosser Tragweite.

Kap. [1.3](#) hinterfragt die Rolle der Sinusschwingung als Legosteine für Klänge.

1.1. Philosophische und ästhetische Grundlagen

Der Charakter ist bloß die Brechung und Farbe, welche der Strahl des Willens annimmt. [Jean Paul, Vorschule der Ästhetik, 1804]

Vereinfacht lassen sich zwei auf die griechische Antike bezogene Denkstränge unterscheiden, die sich mit der pythagoreischen (diskreten) und der aristotelischen (kontinuierlichen) Weltansicht umreißen lassen. Vor diesem groben Raster können einzelne Positionen ausdifferenziert werden. Bis zum ausgehenden 16. Jahrhundert scheint diese Reduktion unproblematisch zu sein. Die tief greifende Veränderung der Mathematik im Laufe des 17. Jahrhunderts lässt zwar die antiken Positionen noch erkennen, jedoch scheint ihnen ein wesentliches Gegensatzmoment abhanden zu kommen. Bedeutet die sich bei Descartes abzeichnende Äquivalenz von Algebra und Geometrie eine Synthese von bis dahin unvereinbar scheinenden Lehrmeinungen? Folgt aus den Gleichungen „pythagoreisch = algebraisch“, „aristotelisch = geometrisch“ und „geometrisch = algebraisch“ nicht zwingend „pythagoreisch = aristotelisch“?

Die Kontroverse zwischen Gioseffo Zarlino und Vincenzo Galilei (1578-1589) zur Bestimmung der Konsonanzen lässt die antiken Auffassungen noch unverwässert erkennen. Die Propagierung der gleichstufigen temperierten Stimmung – auch Zarlino scheint ihre Vorteile für die Praxis nicht zu leugnen – stellt für die Mathematik eine Herausforderung dar, die in der Algebra die Erweiterung des Zahlbegriffs erzwingt und die in der Geometrie über die Konstruktionen mit Zirkel und Lineal hinausweist. Die Einführung der Dezimalbruchschreibweise in die europäische Mathematik durch Simon Stevin (1585) ist wohl der Wendepunkt zu Gunsten der irrationalen Zahlen. Die Verschmelzung von Algebra und Geometrie zu einer umfassenden mathematischen Theorie erfordert im ersten Schritt eine Erweiterung der Algebra, die Euklids Kritik an der pythagoreischen Auffassung Rechnung trägt. Sie äussert sich in der Gleichsetzung von Zahlen und Strecken und bedeutet für die Algebra, solange von den Proportionen ausgegangen wird, die Aufnahme unendlicher Rechenverfahren zur Beschreibung und Bestimmung einer Zahl oder Proportion. Der neue Umgang mit dem Unendlichen in der Mathematik läuft synchron zu ihrer allmählichen Umwandlung hin zu einer dynamischen Theorie. Dem Stellenwert des Unendlichen im 17. Jahrhundert wird in Kap. [1.2.3](#) nachgegangen.

Irrationale Zahlen treten vorerst als Ergebnisse von Rechenoperationen auf. Solche Zahlen zu anerkennen beinhaltet auch, die Operationen, die sie verursachen, als arithmetische Verfahren zu akzeptieren. Wird dieser Schritt in der Algebra vollzogen, weist sie über die klassische euklidische Geometrie hinaus. Dass Descartes diese algebraischen Verfahren geometrisch zu interpretieren versteht, rechtfertigt die Wahl des Titels seiner Abhandlung als „Géométrie“ [1637] und nicht als „Algèbre“. Die Verschmelzung der beiden Disziplinen erfordert also nicht nur eine Erweiterung der Algebra, sondern im Gegenzug auch eine Erweiterung der Geometrie.

1.1.1. Vincenzo Galileis Kritik an Zarlinos Konsonanzauffassung

Die Auseinandersetzung über die Definition der Konsonanz und über die Fundierung des Tonsystems zeigt die geistigen Randbedingungen, die der allmählichen Emanzipation des Tones als Forschungsgegenstand vorangehen und ihr zu Grunde liegen. Dabei zeigt sich, dass die von der Tonhöhe verschiedenen Eigenschaften der Töne noch kaum zu theoretischen Überlegungen Anlass geben. Die Auseinandersetzung über den Konsonanz- und Naturbegriff

wird hier einseitig aus Vincenzo Galileis Perspektive beleuchtet. Musikästhetische und musikhistorische Bewertungen im engeren Sinne der Kontroverse finden sich bei Wymeersch [1999] und Palisca [1989].

Für Zarlino sind die verschiedenen Intervalle je nach Einfachheit ihrer Proportion mehr oder weniger natürlich. In den *Istitutioni harmoniche* [1558] bildet der *senario* die Trennlinie. Dieser wird aus den Intervallen gebildet, deren gekürzte Proportionen aus ganzen Zahlen bis und mit sechs bestehen. Diese Intervalle gelten als natürliche Konsonanzen. Die Wahl der Zahl sechs als Grenze wird mit einer algebraischen Besonderheit begründet. Sie ist die kleinste vollkommene Zahl: $6 = 1 + 2 + 3 = 1 * 2 * 3$. Der Senario ersetzt die Tetraktys der alten Griechen und erklärt die Terzen mit den Proportionen 4 : 5 und 5 : 6 zu durch die Natur vorgezeichneten Konsonanzen.

Zarlino plädiert in den *Dimostrazioni* [1571] für einen *ottonario* [vgl. Palisca, 236], der die Konsonanzgrenze von sechs nach acht verschiebt. Dadurch werden die immanenten Probleme einer solchen zahlenmässigen Grenze zwischen Konsonanz und Dissonanz nicht gelöst: Es wird dadurch weder der Oktavinvarianz noch der Rolle der Quarte im Akkordbau und als satztechnische Dissonanz Rechnung getragen. Zudem zieht die Aufnahme der kleinen Sexte (5 : 8) unter die Konsonanzen unerwünschterweise auch diejenige der Siebnerintervalle nach sich.

Gemäss Wymeersch lässt sich Zarlinos kunsttheoretische Auffassung wie folgt zusammenfassen:

Die Natur ist der Kunst übergeordnet. Die Kunst muss die Natur nachahmen. Natur ist Harmonie, und sie ist strukturiert nach (exakten) Proportionen [nach Wymeersch 1999, 79].

Diese Gleichsetzung von Natur und Harmonie ist nicht unproblematisch, weil Zarlino den Begriff *harmonia* erklärermassen in verschiedener Bedeutung verwendet. Die nicht-einfachen Verhältnisse sind in der weiteren Bedeutung von Zarlinos Harmoniebegriff inbegriffen, in der engeren Bedeutung sind damit nur die innerhalb des *senario* möglichen Zusammenklänge gemeint [vgl. Muzzolini 1991, 76-77]. Die Deutung Wymeersch ergibt sich aus Zusammenlegung dieser beiden Bedeutungen der Harmonie und dürfte mit Vincenzo Galileis Interpretation von Zarlinos Standpunkt übereinkommen:

Gli interualli musici, poi tanto sono naturali [...] quelli contenuti tra le parti del Senario, quanto gl'altri che sono fuore di esse parti. e'tanto è naturale il Ditono contenuto dall sesquiquarta quanto, quello che è contenuto dalla super 17 partiente 64. si come ancora tanto è naturale l'accordare dell'otaua drento la dupla, quanto è naturale il dissonare della settima drento la super 4. partiente quinta [...] [Vincenzo Galilei, Discorso intorno all'opere di messer Gioseffo Zarlino da Chioggia, Florenz 1589, 92f]

Die musikalischen Intervalle [...] innerhalb der Zahlen des *Senario* sind ebenso natürlich wie die ausserhalb. Der Ditonus im Verhältnis 81 : 64 ist ebenso natürlich wie derjenige im Verhältnis 5 : 4. Für die Septime ist ebenso natürlich, im Verhältnis 9 : 5 dissonant zu sein, wie es für die Oktave natürlich ist, im Verhältnis 2 : 1 konsonant zu sein [...] [zitiert und übersetzt nach Palisca, 1989, 235-236]

Eine Unterordnung der Kunst unter die Natur wird von Galilei bestritten:

[...] in tutto quello che può l'arte & non la natura, l'arte è superiore alla natura; & in quello che può

[...] in all dem was die Kunst kann, aber nicht die Natur, ist die Kunst der Natur überlegen, und in all

la natura & non l'arte, l'arte è inferiore alla natura.
adunque la natura, sempre ch'ella vien corretta
dall'arte, gli auuiene per essergl'inferiore.
[Vincenzo Galilei, Discorso intorno all'opere di
messer Gioseffo Zarlino da Chioggia, Florenz
1589, 93]

dem, was die Natur, aber nicht die Kunst kann, ist
die Kunst der Natur unterlegen. Es geschieht der
Natur, immer wenn sie durch die Kunst korrigiert
wird, dass sie unterlegen ist.

Natur ist bei Galilei kein metaphysisches Prinzip. „Natürlich“ heisst nur, „kommt in der Natur vor“ [wie bei Fogliano 1529, vgl. Palisca 19989, 227]. Deshalb sind für ihn alle Intervalle natürlich. Die Beurteilung der beiden Zahlenverhältnisse für die grossen Terzen als natürlich besagt nicht, beide seien gleichermassen konsonant. Der Ditonus $81 : 64$ wird an anderer Stelle als Dissonanz angesehen [Dialogo, 12-13; Discorso 20].

Erst wenn mehrere verschiedene Proportionen als das „gleiche“ musikalische Intervall zugelassen sind, kann die klassische Proportionenlehre als endgültig verabschiedet gelten. Dass dies für Galilei nicht der Fall ist, lässt sich auch anhand seiner Beurteilung der Quinte *d-a* im syntonischen Tonsystem aufzeigen:

[...] nel Sintono habbiamo tra la corda D. a vna
quinta dissonante per esser diminuita [...]
[Discorso, 27]

[...] im Syntonischen haben wir zwischen der
Saite d und a eine dissonante Quinte, dadurch dass
sie verkleinert wird [...]

Die Quinte $40 : 27$ ist eine Dissonanz. Von einer sensorischen Gleichsetzung der Intervalle kann also nicht die Rede sein. Konsonanz ist eine Erfahrungstatsache:

Vengo hora per maggiormente dichiararmi a dire,
che la Quinta contenuta della Sesquialtera, è più
perfetta, più suaue di qual si altra forma; com'io
per il mio vdito dopò molte & molte sperienze
(poiche con altro mezzo migliore non so potersene
hauer certezza) ho giudicato. [Discorso, 117]

Ich komme nun dazu zu erklären, dass die Quinte,
die im Verhältnis $2 : 3$ enthalten ist,
vollkommener und süsser ist als in irgenwelcher
anderer Form; wie ich durch mein Gehör nach
unzähligen Erfahrungen (denn ein anderes
besseres Mittel kenne ich nicht um Gewissheit zu
erlangen) geurteilt habe.

Galilei ist Empirist. Sinneserfahrung ist die einzige mögliche Quelle gesicherter Erkenntnis.

È bene naturale che gli estremi suoni della Dupla,
& quelli della Sesquialtera accordino; ma l'esser
diuisa questa in quattro; e quella in sette interualli
d'vna o d'vn'altra misura & gradezza, e tutta cosa
dell'arte [Discorso, 21]

Es ist natürlich, dass die äusseren Töne zur
Proportion $1 : 2$ und diejenigen zu $2 : 3$
akkordieren; aber die Unterteilung dieser in vier
und jener in sieben Intervalle der einen oder
andern Grösse und Abstufung ist ganz Sache der
Kunst.

Die Intervalle selbst sind natürlich, jede Anordnung zu einem Tonsystem hingegen ist künstlich.

Die Zahlenverhältnisse sind nicht die Dinge selbst, sondern nur ein Mass. Erzeugt man die Intervalle nicht durch Variation der Länge bei gleicher Spannung, sondern durch Variation der Spannung – über verschiedene angehängte Gewichte – bei gleicher Saitenlänge erhält man für die Quinte das Verhältnis $9 : 4 = 3^2 : 2^2$ [Discorso 104, vgl. Palisca 1989, 230-231]. Galilei stellt damit eine verbreitete Irrmeinung pythagoreischen Ursprungs richtig und argumentiert gegen die Auffassung, die nur multiple ($1 : n$) und superpartikuläre ($n : (n+1)$) Verhältnisse als Konsonanzen zulässt [Discorso 104]. Je nach Gesichtspunkt erscheint also die Quinte in der Proportion $3 : 2$ oder in der Proportion $9 : 4$.

Zarlinos *senario* scheint damit unsinnig, weil die den Intervallen zugeschriebenen

Zahlenproportionen keine Invarianten unter den verschiedenen Arten der Tonhöhenveränderungen am schwingenden Körper sind. Galileis Argumentation ist nur solange stichhaltig, als die Intervallbestimmung an Eigenschaften des klingenden Körpers und nicht am Schall direkt, unabhängig von seiner Entstehungsweise, vorgenommen werden kann. Das Frequenzverhältnis 1 : 2 der Oktave ist nämlich eine physikalische Invariante, die unabhängig davon ist, ob die Oktave durch Saitenteilung oder durch Veränderung der Saitenspannung mittels Gewichten zustande kommt. Der Zusammenhang zwischen Tonhöhe und Frequenz scheint Galilei nicht zu kennen. Hingegen weist Leonardo da Vinci auf das Sinken der Tonhöhe im Summen von Fliegen hin, wenn durch Verkleben der Flügel mit Wachs eine Geschwindigkeitsverminderung im Flügelschlag bewirkt wird.

Bei Vincenzo Galilei sind die Geschwindigkeit einer Bewegung und die Tonhöhe bloss insoweit Analogien, als dass sie ein mehr oder weniger zulassen:

la onde dico essere altra la natura del suon graue, altra quella dell'acuto, & diuersa dall'vna & dall'altra di queste dico essere quella del mezzano. così parimente dico hauere altra proprietà il moto veloce, altra il tardo, & da questa & da quella lontana dico essere il mediocre. Hora sendo veri questi due principij che verissimi sono, si può facilmente da essi raccorre [...] [Dialogo, 81]

Daher sage ich, dass die Natur des tiefen Tons eine andere ist als die des hohen, und verschieden von beiden ist diejenige des mittleren. Genauso sage ich hat die geschwinde Bewegung eine andere Eigenschaft als die langsame, und von beiden weit verschieden ist die mittelmässige. Aus der Wahrheit dieser beiden Prinzipien, die sehr wahr sind, kann man leicht ableiten [...]

Vincenzo Galileis Position zeichnet sich durch eine strikte Trennung in physikalische Wirklichkeit und abstrakte Zahlen als Mittel ihrer Vermessung aus [Wymeersch 1999, 81]. Hingegen scheint er kaum eine Trennung zwischen den physikalischen Phänomenen und der Sinneswahrnehmung zu machen:

Die Sinne erfassen aufs genaueste die Unterschiede zwischen den Formen, den Farben, den Geräuschen, den Gerüchen und den Tönen. Sie unterscheiden auch das Schwere vom Leichten, das Saure und Raue vom Süssen und Zarten und andere oberflächliche Akzidentien. Aber die inneren Qualitäten und Tugenden kann allein der Intellekt beschreiben. [1589-91] [franz. bei Wymeersch 1999, 81]

Die Sinneswahrnehmung ist unverzerrt und objektiv. Deshalb auch das schon oben festgestellte Vertrauen in die eigenen Beobachtungen. Ein Rekurs auf die Meinung einer Allgemeinheit erübrigt sich. Der systematische Selbstversuch reicht aus zur Verabsolutierung der eigenen Konsonanzerfahrung.

Die angesprochenen Qualitätskriterien, die „oberflächlichen Akzidentien“, sind übrigens genau diejenigen, die Mersenne später auf die Töne anwenden wird und mit physikalischen Eigenschaften der Schallsignale zu erklären versucht [vgl. Kap. [2.6.2](#), [2.7.2](#)].

Galileis Konsonanzauffassung lässt sich allerdings nicht überall auf eine objektivierbare qualitative Hörerfahrung reduzieren.

La qual diuersità di contento da altro non nasce nelle consonanze, che dalla poca ò molta conformità che hanno insieme gli estremi suoni loro; doue le dissonanze che per l'opposito gli hanno disformi & contrarij, feriscono aspramente

Diese Verschiedenheit der Übereinstimmung entsteht in den Konsonanzen von nichts anderem als von der geringen oder starken Gleichförmigkeit, die ihre beiden äusseren Töne haben. Wo die Dissonanzen, die im Gegenteil

l'vdito, imperoche nel cercar ciascuno degli estremi suoni di esse conservarsi in certo modo intero & non voler cedere all'altro, vengono aspramente à ferire il senso: ma più molestamente della Settima che della Semidiapente è offeso, & meno dal Tritono; forse per hauer questo l'istessa quantità di gradi della Quarta, & della Quinta quella, ò per cadere l'vno nella maggior Terza & nella minor Sesta l'altro vi è più imperfetta: & si come la Quarta meno della Quinta consuona, così parimente le dissonanze contenute dall'istessa quantità di corde nel genere Diatonico, più dissuona quella che con la Quinta conuiene, che non dissuona quella che con la Quarta ha conuenienza. [Dialogo, 69, Perche la consonanza piacia, & dispiacia la dissonanza all'vdito]

unförmig und gegensätzlich sind, das Gehör bitter verletzen, weil sie, dadurch dass jeder ihrer beiden äusseren Töne sich auf gewisse Weise ganz erhält und dem andern nicht nachgeben will, den Sinn bitter verletzen: er wird aber lästiger durch die Septim als durch die verminderte Quinte und noch weniger durch den Tritonus beleidigt. Vielleicht weil dieser die gleiche Anzahl Stufen wie die Quarte und jene wie die Quinte hat, oder weil die eine in die grosse Terz und der andere in die kleine Sexte fällt, ist er unvollkommener: und so wie die Quarte weniger konsoniert als die Quinte, so dissoniert bei den Dissonanzen, die in der gleichen Anzahl Stufen des diatonischen Geschlechts enthalten sind, diejenige mehr, die mit der Quinte übereinkommt als diejenige, die mit der Quarte übereinstimmt.

Ex negativo definiert sich hier Konsonanz durch Verschmelzung: Die Töne eines konsonanten Intervalls sind nicht in gleicher Weise disparat erfahrbar wie bei den Dissonanzen. Bemerkenswert ist die sich anschliessende Bewertung der Dissonanzen in ihrem satztechnischen und tonsystembestimmten Kontext. Die Auflösbarkeit von Tritonus und vermindelter Quinte mittels stufenweiser Gegenbewegung in die kleine Sexte oder in die grosse Terz ist ein Grund, weshalb sie weniger dissonant als die Septimen sind. Galilei entfernt sich mit diesem Schritt von einer Konsonanzauffassung, die sich auf isolierbare und objektivierbare Hörwahrnehmungen reduzieren lässt, hin zu einer satztechnischen Beurteilung der Intervallqualitäten.

Zarlino und Vincenzo Galilei haben divergierende Naturbegriffe. Zarlinos „ideale Natur“ korrespondiert mit dem Logosbegriff der Pythagoreer, während sich Galileis Primat der Sinneswahrnehmung auf Aristoxenos beziehen lässt. Die Definition des Angenehmen über die Sinneseindrücke dient Galilei als Rechtfertigung für temperierte Stimmungen [vgl. Kap. [1.1.3](#)]. Der Durchbruch temperierter Stimmungen korrespondiert in der Mathematik mit der Legitimation der irrationalen Zahlen. Irrationale Zahlen haben in der pythagoreischen Lehre kein Existenzrecht. Das folgende Kapitel stellt die antiken Standpunkte schematisierend zusammen.

1.1.2. Algebra vs. Geometrie / Pythagoras vs. Euklid

Für die Pythagoreer ist alles was existiert Zahl und hat ein Logos. Zahlen sind dabei positive ganze Zahlen und dienen dem Zählen und nicht dem Messen. Sie sind Kardinalzahlen. Messen heisst bei den Pythagoreern Vergleichen zweier Kardinalzahlen. Ein solches Zahlenpaar definiert eine Proportion. Logos bedeutet Proportion. Die gewöhnlichen ganzen Zahlen können als spezielle Proportionen der Form $1 : n$ interpretiert werden. Wenn Proportionen gekürzt werden dürfen, ohne dass dadurch ihr Logos ändert, deckt sich der Logosbegriff mit demjenigen der positiven rationalen Zahlen. Die Proportion als metaphysisches Prinzip manifestiert sich auf die verschiedensten Weisen als Sphärenharmonie, als Prinzip der Konsonanz in der Tetraktis, in den rechtwinkligen Dreiecken als pythagoreische Zahlentripel ... Sie ist für die Pythagoreer mehr als nur Mass aller Dinge, sie ist die Sache selbst.

Euklid, der aristotelischen Denktradition verhaftet, beweist, dass die Quadratwurzel von 2,

keine rationale Zahl sein kann, geometrisch ausgedrückt: Das Verhältnis von Quadratseite und Diagonale ist inkommensurabel, kann also nicht durch eine Proportion exakt beschrieben werden. Die Existenz der Quadratwurzel ergibt sich in Euklids geometrischer Perspektive aus der Existenz des Quadrats. Aus geometrischer Sicht ist das pythagoreische System inkonsistent, weil ein real existierendes Streckenverhältnis nicht unter den Logos-Begriff fällt. Der Satz „alles ist logos“ ist demnach zu verwerfen. Die Proportionenlehre allerdings kann und will hier keinen Widerspruch sehen. Der euklidische Abstandsbegriff basiert auf einer im vornherein kontinuierlichen Weltsicht. Überspitzt formuliert schliessen sich in der diskreten pythagoreischen Welt die Existenz von Diagonale und Quadratseite gegenseitig aus. Kardinalzahlen und Streckenlängen sind eben keine äquivalenten Begriffe. Behält man im Auge, dass die Existenz negativer Zahlen bis ins 17. Jahrhundert umstritten war, braucht es nicht zu erstaunen, dass auch der Status irrationaler Zahlen problematisch ist. Die pythagoreische Sicht reduziert die Funktion der Zahl auf das Zählen von Objekten. Der euklidische Abstandsbegriff ist ihr systemfremd.

Gemäss Krämer besteht in der pythagoreischen Zahlentheorie kaum eine Trennung zwischen Signifikat und Signifikant, d.h. die räumlichen Zahlenkonstellationen der *psēphoi* (Rechensteine) werden für die Zahlen selbst genommen [Krämer 1991, 15-16]. Krämer geht davon aus, dass die „symbolische Differenz“ zwischen Bedeutung und Symbol von den Pythagoreern nicht erkannt wurde [Krämer 1991, 7-87]. Vielleicht wurde sie aber aus ideologischen Gründen geleugnet.

Die Pythagoreer verschliessen sich, gemäss Wymersch, der „sensation auditive“ wegen ihrer Unvollkommenheit und Ungenauigkeit. Demgegenüber ist in der aristotelischen Sicht Konsonanz eine von der Allgemeinheit geteilte auditive Wahrnehmung, das heisst eine Erfahrungstatsache. Aristoxenos, Schüler von Aristoteles, wird heute als Begründer einer musikalischen Ästhetik angesehen, die von einem Primat der Empfindung ausgeht und sich an den „musikalischen Tatsachen“ orientiert. Der Verstand hingegen ist in der Beurteilung des Schönen beteiligt. Das Ohr bestimmt die Ausdehnung der Intervalle als Strecken (Geometrie), der Intellekt erfasst die Werte des Zahlenverhältnisses (Algebra). Aristoxenos nimmt demnach eine Mittelstellung zwischen reinem Intellektualismus und Empirismus ein. [Wymeersch 1999, 67]

1.1.3. Rechtfertigung temperierter Stimmungen

Ptolemaios und Didymos zerlegten die grosse Terz $5 : 4$, wegen des Fehlens einer mittleren Proportionale innerhalb der ganzzahligen Proportionen in zwei verschiedenen grosse Ganztöne. Die Ganztöne $10 : 9$ und $9 : 8$ sind nicht etwa als Approximation von $\sqrt{5/4}$ zu deuten, sondern als zwei verschiedene Intervalle, die sich aus der harmonischen Teilung der reinen Terz ergeben. Die Einführung der syntonischen Stimmung ist letztlich nur pythagoreische Proportionenlehre mit vergrössertem Zahlenvorrat. In der *Musica theorica* [1529] liefert Ludovico Fogliano die rationalen Grundlagen für die syntonische Stimmung [Palisca, 227]. Darüber hinausgehend plädiert er für die Nachregulierung der zweiten diatonischen Stufe um ein halbes syntonisches Koma $\sqrt{81:80}$ und gibt dazu eine auf Euklid zurückgehende geometrische Konstruktion [Abbildung, Palisca, 228]. Die Terz B-D wird dadurch vom pythagoreischen ($81 : 64$) zu einem irrationalen Zahlenverhältnis, in der Intervallgrösse aber,

rückt sie der reinen grossen Terz etwas näher als die pythagoreische. Im Spezialfall, zur Halbierung eines Intervalles, werden irrationale Zahlen zugelassen. Sie sind aber Näherungen für ganzzahlige Proportionen.

Vincenzo Galilei verwendet umgekehrt die ganzzahlige Proportion 18 : 17 zur Approximation von $\sqrt[12]{2}$ [Dialogo, 49; Discorso, 55; Palisca, 237] als Regel zur Positionierung der Lautenbünde. Die gleichstufige Stimmung ist erklärtes Fernziel! Zieht man die Spannungs- und Längenänderung durch das Drücken der Saiten in Rechnung, wird die Übereinstimmung noch besser (freundlicher Hinweis von Dorothea Baumann 2003).

Bei Lauteninstrumenten ergibt sich eine temperierte Stimmung aus baulichen Gründen fast zwangsläufig. Da die Bünde, solange sie aus einem Stück sind, gleichzeitig die Verkürzung aller Saiten regeln, ergibt sich für die Ganztöne *a-h*, *d-e* und *g-a* auf der a-, d- und g-Saite das gleiche mathematische Intervall. In der syntonischen Stimmung für C-Dur wäre aber *d-e* ein kleiner (9:10) und die andern beiden grosse Ganztöne (8 : 9). Die Unterscheidung in grosse und kleine Ganztöne entsprechend der syntonischen Stimmung ist also ohne besondere bauliche Massnahmen wie Doppelbünde auf Lauteninstrumenten nicht möglich.

Mit der Einführung der Dezimalbruchentwicklung in die europäische Mathematik durch Simon Stevin [De thiende, 1585; vgl. Pfeiffer et al. 1994, 346] werden irrationale Zahlen allmählich salonfähig. Mit Hilfe von Dezimalbrüchen kann $\sqrt[12]{2}$, die Basis für die gleichmässig temperierte Stimmung, beliebig gut angenähert werden. Stevin berechnet um 1600 eine solche Näherung [Wymeersch 1999, 73]. Eine bessere Dezimalbruchdarstellung fügt einer bestehenden nur weitere Nachkommastellen hinzu und lässt die schon berechneten Stellen unverändert. Demgegenüber lässt eine auf Proportionen basierende bessere Näherung in den beiden Zahlen keinen Zusammenhang zu einer vorausgehenden Näherung mehr erkennen. So ist im System der Proportionen nicht auf einen Blick ersichtlich, welcher der Halbtöne 18 : 17, 256 : 243 der Grössere ist, nicht einmal dass sie ähnlich gross sind. Das Aufstellen der Dezimalbruchentwicklung erlaubt aber den direkten Vergleich:

$$\frac{18}{17} = 1.05882..., \frac{256}{243} = 1.05349..., \sqrt[12]{2} = 1.05946...$$

Ein mechanisch-geometrisches Verfahren zur exakten Bestimmung von *n* mittleren Proportionalen, d.h. für die *n*-te Wurzel, wird in Descartes' *Géometrie* [1637] beschrieben. Zirkel und Lineal genügen dazu nicht. Die Konstruktion der Kubikwurzel und damit der grossen Terz der zwölfstufigen Temperierung ist mit Zirkel und Lineal nicht möglich. Hingegen bietet der temperierte „Diabolus in musica“, der Tritonus als Diagonale im Quadrat keine Konstruktionsschwierigkeiten. Das Beispiel der Diagonale des Quadrats findet sich bei Galileo Galilei, Discorsi, 1. Tag, 80-88 in Zusammenhang mit der Oktavhalbierung [vgl. Bailhache, 1993]

Die Bestimmung der zwölfstufigen Temperierung auf algebraischem Weg erzwingt also eine Erweiterung des Zahlbegriffs. Eine geometrische Bestimmung hingegen erfordert neuartige Konstruktionswerkzeuge und -verfahren fürs Zeichnen von Kurven.

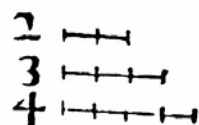
Wenn auf Grundlage der Dezimalbruchdarstellung geschlossen wird, „gleichstufige Temperierung ist möglich“ [Wymeersch 1999, 73], scheint dies auf den ersten Blick gleichbedeutend mit der Existenz irrationaler Zahlen, d.h. mit dem Akzeptieren des kontinuierlichen Paradigmas. Genau genommen ist für die Beschreibung der zwölfstufigen

Stimmung die Adjungierung von $\sqrt[12]{2}$ zum rationalen Zahlenkörpers ausreichend. Der kleinste Zahlkörper $Q(\sqrt[12]{2})$, der die Musikarithmetik erlaubt, ist damit eine diskrete das heisst *abzählbar unendliche* Teilmenge aller reellen Zahlen, ebenso wie die ganzen und rationalen Zahlen. Die Dezimalbruchentwicklung beschreibt eine irrationale Zahl mit Hilfe eines unendlichen, nie abbrechenden Verfahrens als Grenzwert (siehe unten). Es ist also möglich, die gleichstufige Temperierung auf rechnerische Art beliebig gut anzunähern. Für Zarlino und alle Verfechter der reinen Stimmung hingegen sind irrationale Zahlen, die inkomensurablen Proportionen, keine *nombres sonores*, sie sind von der Musik als inexistent a priori ausgeschlossen. Jeder Computer scheint den Pythagoreern recht zu geben: Wenn in endlicher Zeit nur endlich viele Rechenoperationen ausführbar sind, ist das Seitenverhältnis von Quadratseite zu Diagonale inexistent, es ist nämlich (in den üblichen Zahlenformaten der Computer) keine Maschinenzahl, sondern nur als Näherungswert verfügbar. So gesehen ist eine irrationale Zahl als unendliches Verfahren in ihrem Existenzstatus durchaus fragwürdig.

1.1.4. Descartes' ästhetische Prinzipien

Descartes gibt zu Beginn seines im Jahr 1619 verfassten musicae *Musicae Compendium* eine Art Axiomensystem der Ästhetik. Die acht Punkte werden hier in verkürzter, paraphrasierender Form wiedergegeben [Descartes 1619², 2-5] :

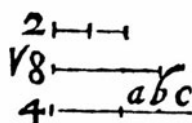
1. Alle Sinne sind genussfähig.
2. Zwischen dem wahrzunehmenden Objekt und dem Sinn soll eine gewisse Verhältnismässigkeit bestehen. Donner und Klapsgeräusche eignen sich nicht für die Musik. Verlangt wird eine massvolle Intensität, unterhalb der Schmerzgrenze, kein Blendlicht.
3. Das Objekt, darf für die Wahrnehmung nicht zu schwierig und zu verwirrend sein. Innere Symmetrien, identische Teile vereinfachen die Struktur eines zusammengesetzten Objekts.
4. Ein Objekt, dessen Teile unter sich ähnlicher sind, kann leichter durch die Sinne erfasst werden als eines ohne innere Ähnlichkeiten.
5. Die Teile eines Objekts, die unter sich in einer engeren Beziehung stehen, sind weniger verschieden.
6. Eine solche Beziehung (Proportion) soll arithmetisch und nicht geometrisch sein. Descartes diskutiert folgendes Beispiel [Descartes 1619², 4]:



$$4 : 3 : 2$$

Identität der Differenz:

$$4 - 3 = 3 - 2 = 1$$

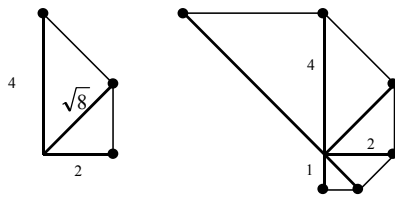


$$4 : \sqrt{8} : 2$$

Identität des Quotienten:

$$4 : \sqrt{8} = \sqrt{8} : 2 = \sqrt{2}$$

Die arithmetische Proportion (links) erschliesse sich dem Auge unmittelbar, nicht aber die irrationale geometrische Proportion (rechts). Die Multiplikation ist die komplexere Operation als die Addition. Das Postulat kann als Argument gegen die Temperierung der Oktave verstanden werden. Die Proportion $2 : \sqrt{8} : 4$ stellt die durch den Tritonus geometrisch geteilte Oktave *c-fis-c'* in 12-temperierter Stimmung dar. In zwei Dimensionen bietet sich für diesen Fall folgende Darstellung mit zwei rechtwinklig gleichschenkligen Dreiecken, halbierten Quadraten an:



Geometrische Deutung des Klangs *c-fis-c'*. Die fortlaufende Proportion *c-fis-c'-fis'-c''-fis''-c'''* kann durch Anhängen weiterer rechtwinklig gleichschenkliger Dreiecke gedeutet werden. Die hervorgehobenen Punkte der Berandung liegen auf einer Spirale.

Die negative Beurteilung der geometrischen Proportion ist nicht unproblematisch, da bei der Grössenbeurteilung der musikalischen Intervalle Gleichheit die Gleichheit des Quotienten und nicht die Gleichheit der Differenz fordert. Im Zusammenklang äussert sich Gleichheit der Differenz allenfalls als Gleichheit der Schwebungsfrequenz.

7. Die für die Seele angenehmsten Sinnes-Objekte sind weder die einfachsten noch die komplexesten. Ein Mittelmass an Entropie ist Voraussetzung für höchsten Kunstgenuss.

8. Vielfalt, Abwechslung macht ein Kunstwerk angenehm. Angenehm und traurig sind nicht unvereinbar. *Angenehm* nimmt zwischen *Einfach* und *Komplex* eine Mittelstellung ein. Abwechslung ist ein Gestaltungsprinzip ersten Ranges zur Erzeugung angenehmer Sinneseindrücke.

Mersenne wendet das Abwechslungsprinzip sogar auf die Gestaltung des Einzeltons an:

Choisissez tel son que vous voudrez, & l'oyez continuellement, il vous endormira, ou vous fera mal à la teste. [...] C'est donc la variété qui rend le son agreable & s'il n'est varié, il merite plutost d'estre appellé bruit que son harmonique; & parce que la variété ne se peut faire qu'avec le temps, tous les sons ont besoin de temps pour faire quelque variété; & quelque impression dans l'esprit qui nous les fait admirer & souhaitter. [Mersenne 1636/I, 12]

Der kontextfreie gehaltene Einzelton ist unter geeigneten Umständen durchaus angenehm und bewundernswert, nicht aber als stationärer Schall mit zeitlich konstanter spektralen Zusammensetzung. Eine angenehme Variabilität wird dadurch bewirkt, dass der Ton in der Zeit gestaltet wird und dank seiner Dauer auch als Gestalteter empfunden werden kann. Wegen seiner Modulierbarkeit geniesst deshalb der Ton der Violine bei Mersenne höchstes Ansehen unter den musikalischen Tönen.

Die Praenotanda 3. - 5. stehen dem strukturalistischen Ansatz von Mazzola [1990], bei dem lokale Symmetriebeziehungen eine zentrale Rolle spielen, nahe. Bailhache vermutet für die ersten drei Prinzipien einen Aristotelesbezug und betont die Neuheit des sechsten [Bailhache 2001, 67-69].

1.1.5. Die Monadenlehre von Leibniz

In Zusammenhang mit der Wesensbestimmung der Töne als *Mannigfaltigkeit in der Einheit* ist die *Monadenlehre* von Leibniz eine gesonderte kurze Betrachtung wert. Es wäre falsch anzunehmen, dass die Verwendung dieser Begriffe im 18. Jahrhundert immer auch eine Anleihe bei Leibniz ist. *Einheit in der Vielheit* ist im 18. Jahrhundert ein allgemeines Postulat, das vom musikalischen Kunstwerk gefordert wird. Das oben skizzierte ästhetische

Programm von Descartes ist dafür eine Präzisierung. Parallelen zu Rameau, Tartini und Mattheson kommen in den Kapiteln [3.1.3](#), [3.1.8](#) und [3.1.9](#) zur Sprache.

Der für Leibniz' Philosophie zentrale Begriff der *Monas* war in Anwendung auf die Musik schon im 17. Jahrhundert gebräuchlich:

“Monas bezeichnet in der Musiktheorie des 17. Jahrhunderts häufig den Einzelton, gerne wird *Monas* / *Monade* mit den Begriffen *Dyas Musica* (= Intervall) und *Trias Musica* (=dreistimmiger Akkord) verbunden. Dieser Sprachgebrauch lässt sich etwa bei Johann Lippius (1612) und Wolfgang Caspar Printz (1676) verfolgen [...]. Auch Johann Georg Sauer spricht in seiner Dissertation *De Musica* (1661, §7) in diesem Sinne von ‚sonis sive monadibus Musicis‘ [...], aus denen die Akkorde zusammengesetzt seien.“ [Rolf Dammann, Der Musikbegriff im deutschen Barock, Laaber 1967, 41 zitiert nach Leisinger, 1994, 97]

Gemäss Leisinger verwendet Leibniz den Begriff der *Monade* ab 1696. Die Monadologie entstand 1714 in französischer Sprache ohne Titel und enthält 90 Lehrsätze. Wir zitieren im Folgenden nach Leisinger, *Leibniz-Reflexe in der deutschen Musiktheorie des 18. Jahrhunderts*, 1994.

§1. Die Monade, von der wir hier sprechen werden, ist nichts anderes als eine einfache Substanz, die in die zusammengesetzten eingeht; einfach, das heisst ohne Teile. [Leisinger 1994, 93]

§2. Es muss einfache Substanzen geben, weil es zusammengesetzte gibt; denn das Zusammengesetzte ist nichts anderes als eine Anhäufung oder ein Aggregat von Einfachem. [Leisinger 1994, 93]

Die Begriffe einfach und zusammengesetzt bedingen sich gegenseitig. Die Existenz des Zusammengesetzten ist evident, folglich existiert auch das Einfache. Teilbarkeit ist eine notwendige Bedingung für Räumliches:

§3. Da aber, wo es keine Teile gibt, gibt es weder Ausdehnung, noch Gestalt noch mögliche Teilbarkeit. [Leisinger 1994, 95]

Räumliche Begriffe sind ohne Teilbarkeit unvorstellbar.

§6. So kann man sagen, dass die Monaden nur mit einem Schlag zu sein beginnen und enden können; das heisst sie können nur durch Schöpfung zu sein beginnen und nur durch Vernichtung zu sein aufhören, während das, was zusammengesetzt ist, durch Vereinigung von Teilen beginnt und durch Auseinandertreten der Teile endet. [Leisinger 1994, 95]

Das Zusammengesetzte existiert nur als Konstellation/Konfiguration seiner Teile. Gewisse Monaden sind der Schöpfung und ihrer Zerstörung unterworfen. Da sie unteilbar sind, können sie nur plötzlich erschaffen und plötzlich vernichtet werden. Der Begriff Schöpfung zielt auf einen Gottesbeweis.

§7. Es gibt auch kein Mittel zu erklären, wie eine Monade in ihrem Inneren von irgendeinem anderen Geschöpfe verändert oder gewandelt werden könnte, da man in sie nichts übertragen noch sich irgend eine innere Bewegung in ihr vorstellen kann, die dort in ihrem Innern hervorgerufen, geleitet, vermehrt oder vermindert werden könnte, wie das bei zusammengesetzten Dingen geschieht, wo es Veränderungen zwischen den Teilen gibt. [Leisinger 1994, 95]

§8. Indessen müssen die Monaden irgendwelche Eigenschaften haben, sonst wären sie sogar keine Seiende. [Leisinger 1994, 96]

Alles was ist, hat Eigenschaften. Da es Monaden gibt, haben sie Eigenschaften.

§9. Jede Monade muss sogar von jeder anderen verschieden sein. Denn es gibt niemals in der Natur zwei Seiende, die einander vollkommen gleich wären und bei denen es nicht möglich wäre, einen inneren oder auf einen inneren Bestimmung beruhenden Unterschied zu finden. [Leisinger 1994, 96]

Die Monaden sind paarweise verschieden. Verschiedene Dinge können nicht in allen ihren Bestimmungsmerkmalen übereinstimmen. Isomorphe verschiedene Objekte unterscheiden sich durch ihre räumliche Positionierung. Diese Positionierung ist ein Merkmal des Objekts.

§10. Ich nehme es für zugestanden, dass jedes geschaffene Seiende und folglich auch jede geschaffene Monade der Veränderung unterworfen ist, und dass diese Veränderung sogar in jeder Monade fortdauernd vor sich geht. [Leisinger 1994, 96]

Die stetige Veränderung der Monaden wird hier axiomatisch vorausgesetzt. Ohne das Prinzip der Veränderung ist Leben nicht beschreibbar. §10 steht an der Grenze zum Widerspruch mit §7. Bewegung/Veränderung kann nicht von aussen in eine Monade hereingetragen werden. Sie ist eine innere Bestimmung.

§12. Ausser dem Prinzip der Veränderung bedarf es einer besonderen Eigenart des sich verändernden Subjekts, die sozusagen die Besonderung und Mannigfaltigkeit der einfachen Substanz bewirkt. [Leisinger 1994, 136]

§13. Diese Besonderheit soll eine Vielheit in der Einheit oder in dem Einfachen einschliessen. Denn da sich jede natürliche Veränderung ohne Sprünge vollzieht, verändert sich etwas und etwas ruht. Und folglich muss es in der einfachen Substanz eine Mehrzahl von Bestimmungsmomenten und Beziehungen geben, obschon es keine Teile von ihr gibt. [Leisinger 1994, 136]

Bewegung impliziert im Minimum zwei Bezugsgrössen. Ihre Darstellung erfordert ein mindestens zweidimensionales Koordinatensystem: eine eindimensionale Bewegung als Funktion der Zeit. Bewegung ist stetig: Kleine Zeitänderungen äussern sich in kleinen Ortsveränderungen.

Die Monade kann an sich und in jedem Augenblick von einer anderen nur durch innere Eigenschaften und Handlungen unterschieden werden, die nichts anderes sein können als ihre *Perzeptionen* (d.h. die Darstellungen des Zusammengesetzten oder dessens, was aussen ist, im Einfachen) und ihre *Strebungen* (d.h. ihr Tendieren von einer Perzeption zur anderen), die die Prinzipien der Veränderung sind. [Principes de la nature et de la grâce, §2] [Leisinger 1994, 97]

1.2. Von der Zahl zur Differenzialgleichung : Mathematik und Physik im 17. und 18. Jahrhundert

Während bis zum Ende des 16. Jahrhunderts die Objekte der Mathematik die Zahlen bleiben, auch wenn sich der dahinter liegende Zahlbegriff verändert, wandelt sich die Mathematik im Laufe des 17. Jahrhunderts viel tiefgreifender. Durch Descartes' Synthese von Algebra und Geometrie wird der Grundstein zu einer dynamischen Theorie gelegt, die es erlaubt physikalische Prozesse als mathematische Objekte zu interpretieren. Dadurch könnten Töne in neuer Form als mathematische Objekte greifbar werden.

1.2.1. Beobachtung und Naturgesetz

Vom geozentrischen zum heliozentrischen Weltbild : die einfache Formel

Kopernikus und Kepler „glaubten, dass Gott einfache mathematische Theorien bevorzugen müsse. Diese Sicht war typisch für das beginnende 17. Jahrhundert, das nach Wissen strebte, das in einfachen und harmonischen Formeln ausdrückbar ist.“ [Pfeiffer et al. 1994, 29] „Das Keplersche System beschreibt den Lauf der Planeten um die Sonne in Form einfacher mathematischer Gesetze, deren Grundlage die zahlreichen hinterlassenen Beobachtungen Tycho Brahes sowie eigene Beobachtungen bildeten.“ [Pfeiffer et al. 1994, 28]

Hervorzuheben ist der zunehmende Stellenwert der Beobachtung und des Experiments als Basis der Naturerkenntnis. Er äussert sich in der philosophischen Fundierung der Induktion. Der Begriff erscheint bei Zabarella (1597) und später bei Francis Bacon (1620).

Die Verlagerung des Referenzpunkts (der Ursprung des Koordinatensystems) von der Erde auf die Sonne erlaubt eine einfachere Beschreibung der Planetenbahnen, das heisst eine arithmetisch einfachere und dadurch plausiblere Korrelation der Beobachtungsdaten mit Zahlengesetzen. Der Raum, in dem diese Bewegungen stattfinden, wird vorerst aber noch als endlich, durch die Fixsternsphäre begrenzt gedacht [Pfeiffer et al. 1994, 29].

Das geozentrische Weltbild bedeutet für die katholische Kirche eine Entmachtung Gottes und die Aufgabe der Sonderrolle der Erde. Dennoch hat das Auffinden der Gesetze der Planetenbahnen, welche die kopernikanischen Kreise durch Ellipsen ersetzen, seinen Ursprung in einer metaphysisch religiösen Vorstellung pythagoreischer Herkunft: die universelle Harmonie, die das Gesetz der Zahl (Proportion) ausdrückt [Wymeersch 1999, 46-56] Ohne den Glauben, dass einfache Proportionalitäten, den Lauf der Gestirne regeln, wäre Kepler kaum auf diese Gesetze gestossen.

Das Paradigma der Sphärenharmonie erweist sich also im frühen 17. Jahrhundert noch als erkenntnisfördernd. Die darunter aufgedeckten Gesetze der Planetenbewegungen erhalten in der Newtonschen Mechanik eine Interpretation, die das Grundprinzip der Sphärenharmonie, die Gesetze der ganzzahligen Proportionen, nur noch als Sonderfall begreift und es damit aufgibt.

Die in unveränderlichen, ewigen Gesetzen der Zahl ausgedrückten Naturgesetze implizieren einen passiven Gottesbegriff, welcher die verordneten Hierarchien potenziell untergräbt. Der religions- und allgemein hierarchiezersetzende Aspekt der „Homogenisierung des Raumbegriffs“ [Pfeiffer et al. 1994] wird durch die vorläufige Beibehaltung seiner Endlichkeit etwas entschärft. Immerhin erlaubt das geozentrische Weltbild noch die Identifikation von Gott und Sonne als Quelle des Lebens. Eine Emanzipation der Fixsterne

als Nebensonnen jedoch öffnet der Orientierungslosigkeit Tür und Tor ...

„Das neue Weltbild, das sich in den Theorien von Kopernikus und Kepler zeigte, war von grosser Tragweite. Es zerstörte die mittelalterlich abgeschlossene in Hierarchien geordnete Welt, in der jeder Körper seinen *natürlichen* Ort hatte, und setzte an ihre Stelle einen unbegrenzt ausgedehnten Raum, in dem alle Orte äquivalent sind.“ [Pfeiffer et al. 1994, p. 29] Diese Aussage sei dahingehend relativiert, dass sich dieser Wandel – insbesondere was die Endlichkeit des Raumes angeht – schleichend, auf Grundlage verfeinerter Messmethoden, vollzieht. Die Kategorie des Natürlichen entpuppt sich dabei als Konservierungsfaktor.

Mathematischer Raumbegriff und algebraische Methode

Der heute so genannte euklidische dreidimensionale Vektorraum – wir nennen ihn im Folgenden unseren Lebensraum –, in dem jeder Punkt Ursprung eines Koordinatensystems, das heisst Referenzpunkt der Orientierung, sein kann, hat eine potenziell anarchische Komponente, die sich auch im zunehmenden Stellenwert des Individuums niederschlägt: Jedes Individuum ist Ursprung seines Koordinatensystems.

Die Beschränkung auf die Dimensionszahl drei erweist sich in der Mathematik schon bald als einengend. Viète – im ausgehenden 16. Jahrhundert – erlaubt zwar nur positive Grössen, er zögert aber nicht, vier- und höherdimensionale Strukturen zu betrachten [vgl. Pfeiffer et al. 1994, 109].

Ein Hauptproblem des 16. und frühen 17. Jahrhunderts besteht in der Rechtfertigung der algebraischen Denkweise. Descartes kehrt das Abhängigkeitsverhältnis von Algebra und Geometrie um, indem er algebraische Lösungen für geometrische Konstruktionsaufgaben zulässt. Geometrische Kurven sind für ihn diejenigen, die sich mittels algebraischer Ausdrücke beschreiben lassen (siehe unten). Gemäss Pfeiffer ist die Algebra für ihn eine Methode, während Geometrie und Mechanik noch immer Wissenschaften sind. [Pfeiffer et al. 1994, 109].

Die Anwendung der Algebra auf geometrische Probleme wurde ermöglicht durch das nach Descartes benannte *kartesische Koordinatensystem*, das eine Quantifizierung der Ebene auf Basis der reellen Zahlen darstellt. Koordinatensysteme und die darin mögliche Arithmetik und Algebra werden gemäss Pfeiffer et al. [1994] noch weit eher als kanonische Erweiterung und Hilfsmittel der Logik denn als eigenständige wissenschaftliche Disziplinen verstanden. Allerdings erweist sich die klassische Geometrie bald einmal als eingebettet in derartige algebraische Strukturen.

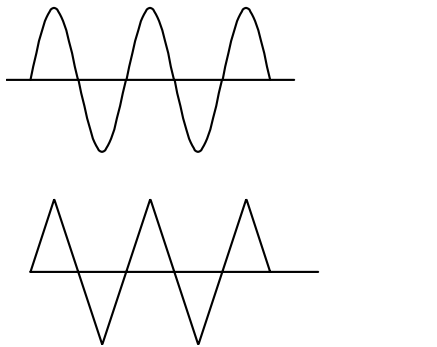
1.2.2. Funktionen zur Modellierung der Welt

Mit dem Begriff der Funktion und der Möglichkeit Kurven zu parametrisieren hat die mathematische Physik mächtige Hilfsmittel der Modellierung zur Hand, welche die Schwierigkeiten der Zuordnung Physik – Mathematik erst ins Bewusstsein treten lassen. Grundvoraussetzung einer solche Parametrisierung ist eine Vereinbarung über das Wesen der Zeit. Die Zeit, als eindimensionale, zyklenfreie, interindividuelle Grösse gedacht, kann mit einer Zahlengerade identifiziert werden. Zusammen mit dem dreidimensionalen euklidischen Vektorraum resultiert daraus als kleinste enthaltende Struktur die Vorstellung eines vierdimensionalen Raum-Zeitkontinuums, in dem stetige Veränderungen als

zusammenhängende Objekte gedeutet werden könnten. Für Lagrange, der 1797 Bilanz zieht, bedeutet hingegen die „Einführung der Bewegung in den Calculus“ noch immer „eine diesem fremde Idee einzubringen“, welche dazu verpflichtet, „diese Größen als von einem bewegten Körper durchlaufene Strecken zu interpretieren“ [zitiert nach Pfeiffer et al. 1994, p. 236]. Das heisst Zeit und Lebensraum werden nicht zu einer vierdimensionalen Struktur integriert.

Anlass zur Entwicklung der mathematischen Theorie der Funktionen und ihrer Nutzbarmachung zu Beginn des 17. Jahrhunderts war die Ballistik, das heisst die Kriegstechnik. Der paradigmatische Begriff der Momentgeschwindigkeit wird geometrisch mit demjenigen der Tangentensteigung, analytisch mit demjenigen der Ableitung eingefangen. Die mechanisch-ballistischen Aufgaben der Zeit erfordern aber auch die Integration, die Umkehroperation der Differentiation (z.B. zur Bestimmung des Weges bei zeitlich variabler Momentgeschwindigkeit). Parametrisierte Kurven im dreidimensionalen Raum erlauben es, beliebige Bewegungen eines Massenpunktes zu beschreiben. Eine solche Bewegungskurve findet sich bei in zwei Briefen Descartes' an Mersenne anlässlich seiner Erklärung des Obertonphänomens [vgl. Kap. [2.4.3](#)]

Die Vorstellung des Schalls als Funktion des Luftdruckes (*battement de l'air*) – nicht seine Ausbreitung als Welle – ist bei einer Parametrisierung durch die Zeit der einfachste, eindimensionale Spezialfall. Eine Visualisierung verwendet mit Vorteil eine zweidimensionale grafische Veranschaulichung mit den Koordinatenachsen Zeit und Schalldruck. Die Bahnkurve einer eindimensionalen Schwingung dagegen degeneriert zu einer mehrfach durchlaufenen Strecke und ist demgemäss wenig aussagekräftig. Sie erlaubt es nicht, eine Sinusschwingung von einer Dreiecksschwingung mit gleicher Maximalauslenkung zu unterscheiden.



Funktionsdarstellung (links) und zugehörige Bahnkurven (rechts) für verschiedene Schwingungsformen.

Mit Hilfe von Funktionen und des darin implizierten Variablenkonzepts wird es möglich, mit endlichen Ausdrücken Aussagen über unendlich viele Objekte zu machen. Dies ist möglich, da solche Ausdrücke auf die Form

alle Zahlen, welche gewisse einschränkende Bedingungen erfüllen

zurückführbar sind.

Ein Blick auf die Spielformen des Unendlichen im siebzehnten Jahrhundert zeigt einen Reichtum mathematischer Fragestellungen, vor dem sich die Diskussion der physikalischen Wesensbestimmung von Schall und Licht abspielt.

1.2.3. Spielformen der Unendlichkeit

Das Unendliche tritt in der Mathematik des 17. Jahrhunderts in vielfältiger Weise in Erscheinung:

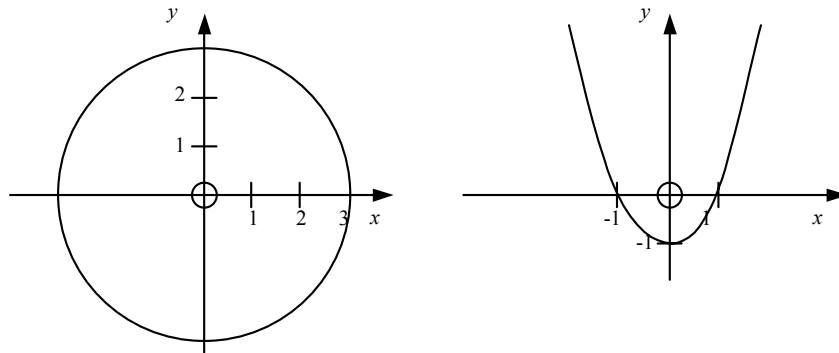
- in Formeln zur Beschreibung von funktionalen Zusammenhängen in Raum und Zeit als Aussagen über unendliche Punktmengen,
- in der Zahlentheorie als Aussagen über unendlich viele ganze Zahlen, damit in Zusammenhang stehen die Verfahren Rekursion und Induktion,
- im Grenzwertbegriff, in diesen Zusammenhang gehören auch irrationale Zahlen und Kettenbrüche,
- bei der Erfindung neuer Funktionen, die unendlich viele Rechenoperationen zur Berechnung eines einzigen Funktionswertes erfordern wie bei den Potenzreihen oder trigonometrischen Reihen,
- als unendlich kleine Grössen, Linien- und Flächenelemente in der Infinitesimalrechnung.

Funktionale Zusammenhänge als Aussagen über unendlich viele Zahlenpaare

Eine Funktion, die durch einen algebraischen Ausdruck in einer Variablen definiert ist, beschreibt über ihren Funktionsausdruck eine Eigenschaft von unendlich vielen Zahlenpaaren. Ein funktionaler Zusammenhang kann grafisch als Punktmenge in einem zweidimensionalen Koordinatensystem veranschaulicht werden. Der moderne Funktionsbegriff entwickelt sich im Laufe des 17. Jahrhunderts und ist für die Infinitesimalrechnung (Newton, Leibniz) unverzichtbar. Descartes' Kurvenbegriff ist eine Vorstufe.

Der Kurvenbegriff bei Descartes, Géometrie 1637

Eine geometrische Kurve bei Descartes ist durch eine algebraische Gleichung, die Kurvengleichung, definiert. Sie besteht aus den Punkten, deren Koordinaten Lösungen ihrer Kurvengleichung sind. Die Gleichung $x^2 + y^2 = 9$ beschreibt einen Kreis um den Nullpunkt des Koordinatensystems mit Radius 3. Die Gleichung $y = x^2 - 1$ beschreibt eine nach oben geöffnete Parabel. Die Kurven, die nicht durch eine algebraische Gleichung beschrieben werden, heissen bei Descartes mechanisch.



Während das Beispiel der Parabel als Funktion interpretiert werden kann, da für jedes x das zugehörige y eindeutig festgelegt ist, erlaubt der Kreis keine solche Interpretation in der Ebene. Um ihn mittels Funktionen zu beschreiben, können die beiden Halbkreise, die durch die x -Achse getrennt sind, je einzeln als Funktionen dargestellt werden:

$$y = \sqrt{9 - x^2} \text{ für den oberen und } y = -\sqrt{9 - x^2} \text{ für den unteren Halbkreis mit } |x| \leq 3.$$

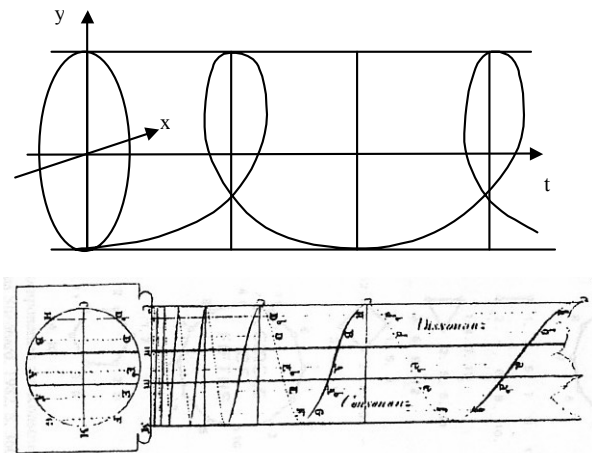
Alternativ dazu kann der obige Kreis aber auch mit einer einzigen Formel in der komplexen Zahlenebene parametrisiert werden:

$$z(t) = 3 \cdot \exp(it) = 3 \cdot (\cos t + i \cdot \sin t) \text{ mit } z = x + iy$$

oder in der gewöhnlichen Ebene in Vektorschreibweise:

$$\begin{bmatrix} x(t) \\ y(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3 \cos t \\ 3 \sin t \end{bmatrix}$$

In diesem Fall wird neben x und y eine weitere Variable t benötigt und in dreidimensionaler Veranschaulichung erhält man anstelle des Kreises eine Schraubenlinie:



Oben: Schraubenlinie zur Darstellung einer zweidimensionalen Schwingung (in x - und y -Richtung in Abhängigkeit von der Zeit t). Unten: Eine gleichartige Darstellung für die Visualisierung der Oktavidentität, die Projektion der Spirale auf den Kreis beschreibt dabei den Übergang von Tonhöhe zu Tonizität. [Quelle: Opelt 1834 aus Ebeling 1999, 91]

Projiziert man diese Schraubenlinie auf die xy -Ebene erhält man den Kreis zurück.

Interpretiert man t als Zeit, so können die letzten beiden Formeln wie folgt gedeutet werden: Der Kreis wird mit konstanter Drehgeschwindigkeit durchlaufen, denn t kann auch als Winkel im Bogenmass interpretiert werden. Je nach Zeitdauer wird der Kreis mehrmals durchlaufen, was zu Winkeln, die grösser als 2π ($= 360^\circ$) sind, führt.

Die gleichförmige Drehbewegung ist somit ein Spezialfall der Überlagerung zweier „Pendelschwingungen“ mit orthogonalen Schwingungsrichtungen. Formuliert man diesen Sachverhalt umgekehrt, kann man auch sagen: Projiziert man die Kreisbewegung eines Punktes auf die beiden Koordinatenachsen, so erhält man als Schatten je Sinusschwingungen. (Cosinusschwingungen sind zeitverschobene Sinusschwingungen.)

Die Bahnkurven bei der Superposition in verschiedenen Raumrichtungen heissen Lissajous-Figuren (nach dem franz. Physiker J.A. Lissajous 1822-1880). Die bereits erwähnten Skizzen zur Erklärung der Teiltöne bei Descartes sind solche Lissajous-Figuren.

Der moderne Funktionsbegriff ist bei Descartes erst im Keim vorhanden, da bei ihm die Koordinatenachsen gleichwertig sind. Es wird nämlich nicht zwischen abhängiger und unabhängiger Variable unterschieden. Eine Parametrisierung der Kurven durch die Zeit zur Beschreibung von Bewegungen oder die Interpretation der x -Achse als Zeit kommt in Descartes' *Géometrie* nicht vor und liegt ausserhalb des Gegenstandes seiner von der Physik losgelösten (algebraischen) Geometrie. Der Funktionsbegriff entsteht aus dem kartesischen Kurvenbegriff durch Spezialisierung, das heisst indem man nur diejenigen Kurven zulässt, bei denen zu einem vorgegebenen Funktionsargument x der Funktionswert y eindeutig bestimmt ist.

Räume von Funktionen mit hoher Dimension?

Ich könnte hier mehrere andere Mittel angeben, um die unendliche Reihe von krummen Linien, die immer um einen Grad zusammengesetzt werden, zu zeichnen und zu erforschen; [Geometrie 1637, 1969, 23]

Der Hauptteil der *Géometrie* befasst sich mit der Bestimmung der Nullstellen von Polynomen. Die obige Parabelgleichung ist ein Beispiel für ein Polynom zweiten Grades. Bei Polynomen unterscheidet Descartes sehr wohl zwischen abhängiger und unabhängiger Variable, je nachdem ist bei ihm die x -Achse oder die y -Achse unabhängige Variable. Mit der Untersuchung von Polynomen vom Grad > 3 scheinen sich aus moderner Sicht Räume mit mehr als drei Dimensionen aufzudrängen: die Koeffizientenfolgen der Polynome vom Grad n bilden nämlich einen $n+1$ -dimensionalen Vektorraum. Formulierungen wie quadratische, kubische und mehr als kubische Gleichungen in Descartes' *Géometrie* lassen geometrische Anspielungen in dieser Richtung erkennen. So verwendet er zum Beispiel den Begriff *sursolide* für Probleme, die nicht in drei Dimensionen veranschaulicht werden können.

Die Frage, ob ein gegebenes Problem in der Ebene oder im dreidimensionalen Raum eine Lösung hat, oder darin veranschaulicht werden kann, ist typisch für Descartes' Denken. Die Funktionen selbst als Punkte in mehrdimensionalen Funktionsräumen zu interpretieren, ist ein Schritt der Abstraktion, der aber über die allmähliche Objekterdung der Funktion im 17. Jahrhundert hinausweist. Sie ist für das Verständnis der Klangfarbe als physikalisch mehrdimensionales Attribut zentral.

Aussagen über unendlich viele Zahlen : unbegrenzter Abstieg, vollständige Induktion

Neben der sich etablierenden kontinuierlichen Sicht der Welt (Koordinatensysteme,

Funktionen, Wellenlehre) erlebt auch die "Quantenperspektive", die Zahlentheorie, die sich bewusst auf die diskreten, ganzen Zahlen beschränkt, im 17. Jahrhundert einen Wiederaufschwung, besonders durch die Arbeiten von Pierre Fermat (1601-1665). Die Beschäftigung mit den ganzen Zahlen bedeutet dabei aber nicht mehr die Leugnung der irrationalen Zahlen.

Pierre Fermat führt 1659 die Methode des unbegrenzten Abstiegs ein. Dieses Beweisverfahren ist eng verwandt mit demjenigen der vollständigen Induktion. Die Methode des unendlichen Abstiegs wird dazu verwendet, Aussagen über unendlich viele Objekte oder Zahlen wie

Es gibt unendlich viele Primzahlen der Form ...,

zu beweisen.

Das Verfahren der vollständigen Induktion wurde von Pascal (1623-1662) in die Mathematik eingeführt. Der springende Punkt ist dabei der Schluss von der hypothetischen Gültigkeit einer Aussage für n auf die korrespondierende Aussage für die Nachfolgerzahl $n + 1$. Falls dieser Übergang gelingt und falls die Aussage für $n = 0$ „verankert“ (verifiziert) ist, gilt die Aussage als bewiesen für alle natürlichen Zahlen n .

Haben Induktion in der Philosophie und Mathematik mehr als nur den Namen gemein?

In der Philosophie wird unter Induktion ein wissenschaftliches Verfahren zur Gewinnung von Erkenntnis auf Grundlage von beobachtenden Experimenten verstanden. Der Begriff geht auf Zabarella (1533-1589) zurück [vgl. Engfer, 1982, 91]. Der typische Induktionsschluss der Philosophie ist der folgende:

Aus endlich vielen Beobachtungen von periodischen Sonnenaufgängen wird gefolgert, dass sich die Sonne auch inskünftig gleichartig verhalten wird.

Naturgesetze – durch eine Formel auf den Punkt gebracht – sind im Empirismus induktive Erkenntnis.

Induktion und Wahrscheinlichkeit

Betreffend Induktion äussern sich die beiden Perspektiven Wahrheit und Wahrscheinlichkeit in der Naturwissenschaft anders als in der Mathematik. Während die Induktion in der Mathematik zu wahren Sätzen über mathematische Sachverhalte führt, sind die Naturgesetze, die sich aus Induktion ergeben, statistischer Natur.

Die Sonne wird auch morgen aufgrund der dann wahrscheinlich noch immer geltenden Naturgesetze aufgehen, falls ...

Diese Art Folgerung hat aber mit dem mathematischen Induktionsschritt eine Gemeinsamkeit, als dass sie einen Zusammenhang zwischen n beobachteten Ereignissen der Vergangenheit und einem $n + 1$ -ten in der Zukunft gelegenen Ereignis behauptet. Etwas näher besehen kann die Wahrheit mathematischer Sätze als Schlussfolgerungen aus den (willkürlich) vereinbarten Axiomensystemen der Logik und den betreffenden mathematischen Theorien relativiert werden. Und umgekehrt erlangen induktive Aussagen einen Wahrheitswert, wenn die Naturgesetze wie in der theoretischen Physik axiomatisch vorausgesetzt werden, wie dies bei Galileo Galilei (1564-1642) und Isaac Newton (1643-

1727) der Fall ist [vgl. Engfer 1982, 97-102].

Die Problematik der Zuordnung von Modell und Wirklichkeit wird dadurch auf eine höhere Ebene verschoben.

Es ist wohl kaum Zufall, dass die Diskussion über die Verfahren der Wissensgewinnung und die Erfindung der Wahrscheinlichkeitsrechnung in die gleiche Zeit fallen.

[Im 20. Jahrhundert ersetzt Karl Popper in diesem Zusammenhang, das in der Induktion implizierte Prinzip der Verifizierbarkeit durch dasjenige der Falsifizierbarkeit und rückt dadurch den vorläufigen Charakter induktiver Erkenntnis wieder verstärkt ins Bewusstsein. Er meint damit, dass naturwissenschaftliche Theorien nie bewiesen, sondern höchstens widerlegt werden können. Sie sind also solange akzeptabel, als sie nicht falsifiziert sind. Durch diese doppelt-negative Formulierung wird der Wahrscheinlichkeitscharakter induktiver Erkenntnis etwas verschleiert.]

Algorithmen mit unendlich vielen Berechnungsschritten

Um unendlich viele Rechenoperationen mathematisch zu bewältigen, ist der Begriff des Grenzwerts unverzichtbar. Letztlich geht es dabei meistens darum, ein zu einem endlichen Verfahren gleichwertiges unendliches anzugeben oder umgekehrt.

Beispiele für Reihen

$$1 + 1/2 + 1/4 + 1/8 + 1/16 + \dots = 2$$

$$1 + 1/2 + 1/3 + 1/4 + 1/5 + 1/6 + \dots = ?$$

$$1 + x + x^2 + x^3 + x^4 + \dots = \frac{1}{1-x} \text{ falls } -1 < x < 1$$

Das erste Beispiel zeigt die Darstellung einer gewöhnlichen Zahl als unendliche Summe. Es wird auch von Descartes angeführt. Das Besondere dabei ist, dass das unendliche Verfahren zur Berechnung der linken Seite gegen eine rationale Zahl konvergiert. Es ist also nicht korrekt, aus dem Vorliegen eines solchen unendlichen (monotonen) Verfahrens auf die Irrationalität des Grenzwerts zu schliessen. [Der Beweis der Irrationalität des goldenen Schnittes am Pentagramm der Pythagoreer anhand der Unendlichkeit des Verfahrens ist also mit Vorsicht zu genießen, vgl. Krämer 1991]

Das zweite Beispiel, die sogenannte harmonische Reihe, konvergiert nicht, denn die „Summe“ wächst über alle Schranken, obschon die zu addierenden Terme beliebig klein werden! Diese Eigenschaft ist für geometrische Besonderheiten bei der Fouriersynthese verantwortlich, wenn die Koeffizientenfolge eine harmonische Reihe bilden [vgl. Koenig 1881, Plomp 1973].

Das dritte Beispiel, die allgemeine Formel für die geometrische Reihe, kann als Gleichheitsbeziehung zweier Funktionen gedeutet werden. Der Term auf der rechten Seite stellt dabei für $x > -1$ einen Hyperbelast dar. Die linke Seite könnte dazu verwendet werden, ohne Verwendung von Divisionen Näherungen an diese Hyperbel zu bestimmen. Die Näherung ist nur für $-1 < x < 1$ zulässig, denn für $|x| > 1$ wachsen die Potenzen x^n auf der linken Seite und damit ihre Summe ins Unendliche. Derartige Reihen heissen Potenzreihen. Newton bestimmt Potenzreihen zu $(1+x)^q$ mit q rational, $\sin(x)$ und $\cos(x)$, zum

Ellipsenbogen und zu den Umkehrfunktionen der trigonometrischen Funktionen [Pfeiffer et al., 235].

Ein Beispiel von Leonhard Euler gegen Bernoulli bei der Diskussion des mathematisch Einfachen ist von der dritten Art und verwendet die geometrische Reihe [vgl. Kap. [1.3.4](#) und [3.1.6](#)].

Objektwerdung der Funktion und Infinitesimalrechnung

Beispiel: Integration der Funktion $1/(1+x)$ (Hyperbel) nach Nicolaus Mercator, Logarithmotechnica, 1668 [Pfeiffer et al. 1994, 235]

Der Ausdruck $\frac{1}{1+x}$ wird wie im letzten Abschnitt in eine geometrische Reihe entwickelt und gliedweise integriert, ein Verfahren, das auch John Wallis schon bekannt war.

$$\begin{aligned}\frac{1}{1+x} &= 1 + x + x^2 + x^3 + x^4 \dots = \sum_{n=0}^{\infty} x^n \\ \int \frac{1}{1+x} dx &= \int (1 + x + x^2 + x^3 + x^4 + \dots) dx = \int 1 dx + \int x dx + \int x^2 dx + \int x^3 dx + \int x^4 dx + \dots = \\ x + \frac{1}{2}x^2 + \frac{1}{3}x^3 + \frac{1}{4}x^4 + \frac{1}{5}x^5 + \dots &= \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} x^n\end{aligned}$$

Der einfache Ausdruck $\frac{1}{1+x}$ wird zuerst durch eine Summe von unendlich vielen Ausdrücken ersetzt.

Die letzteren können einzeln als allgemeine Ausdrücke integriert werden. Falls die Übereinstimmung (des gesuchten Integrals mit der Summe der Integrale) unter Berücksichtigung von immer mehr Termen immer besser wird, ist es legitim, das eine durch das andere zu ersetzen. Der "Umweg über die Unendlichkeit" hat demnach einen Informationsgewinn zur Folge. Die Lösung erlaubt nämlich die approximative Berechnung der Fläche unter der Hyperbel mit beliebiger Genauigkeit.

[Der kritische Punkt in obiger „Herleitung“ ist die mit „?“ markierte Vertauschung von Summation und Integration.]

"Die Idee, unendliche Algorithmen zur Definition von Funktionen heranzuziehen, insbesondere die Potenzreihenentwicklung, erwies sich als wesentliche Antriebskraft bei der Erweiterung dieses Begriffes." [Pfeiffer et al. 1994, p. 235]

Leibniz verwendet 1673 in einem unveröffentlichtes Manuskript erstmals den Begriff der Funktion [Pfeiffer et al. 1994, p. 237]. Die Einführung des Begriffs steht in Zusammenhang mit dem so genannten inversen Tangentenproblem. Es geht dabei um die Rekonstruktion einer Kurve aus ihren Tangentensteigungen. Die neue Perspektive äussert sich darin, *unbekannte Funktionen* und nicht mehr nur *unbekannte Zahlen* zu betrachten, was die Objektwerdung der Funktionen vorantreibt und aus sprachökonomischen Gründen einen Begriff für diese neuen Objekte nahelegt. Gemäss J. Hadamard sei nach der Einführung der Infinitesimalrechnung durch Newton und Leibniz „das mathematische Sein [...] nicht mehr länger die Zahl, sondern vielmehr das Gesetz der Veränderung, die Funktion. Somit wurde die Mathematik nicht nur um neue Methoden bereichert, vielmehr hat sich auch ihr Gegenstand geändert.“ [Pfeiffer et al. 1994, p. 238]

„Fermat und Barrow (1630-1677) haben nur knapp die Entdeckung der allgemeinen Methoden verfehlt, die die Infinitesimalrechnung zu einem autonomen Teilgebiet der Mathematik machen sollte. Während Fermat analytische Methoden besaß, die äquivalent zur

Differentiation und Integration waren, erkannte Barrow die fundamentale Beziehung zwischen diesen beiden Problemen.“ [Pfeiffer et al. 1994, p. 201] Diese Zusammenhänge sind Gegenstand des heute so genannten Hauptsatzes der Differential- und Integralrechnung, der erstmals von Cauchy 1823 bewiesen wird.

Innerhalb der Mathematik werden also im 17. Jahrhundert die verschiedenen Ansätze ebensowenig zu einer geschlossenen Theorie integriert, wie auch die gehörphysiologischen und physikalisch-akustischen Erkenntnissen nicht zu einer umfassenden Theorie des Klangs führen, obschon die Bausteine dazu durchaus vorhanden wären. Es ist zu vermuten, dass falls Descartes seinen Begriff der Kurve auf denjenigen der Funktion spezialisiert hätte, das Superpositionsprinzip ohne weiteres durch ihn oder Mersenne hätte in algebraisch griffige Form gebracht werden können.

Da die schwingende Saite – seit den Pythagoreern – der Inbegriff des Tons ist, muss in unserem Zusammenhang gefragt werden, weshalb das 17. Jahrhundert noch zu keiner geschlossenen Theorie der Saitenbewegung gelangt. Aus Sicht der Physik präsentiert sich die Bewegung der idealen Saite, die zu einem bestimmten Zeitpunkt eine vorgegebene Ausgangsform hat und dann losgelassen wird, als eine Bewegung mit unendlich vielen Freiheitsgraden. Diese unendlich vielen Freiheitsgrade werden an den Obertönen manifest. Die Obertöne können in ihrer Stärke und ihrem Vorhandensein je unabhängig voneinander variiert werden. Diese Variabilität des Spektrums kann durch Veränderung der Anfangsgestalt und Anfangsgeschwindigkeit der Saite beeinflusst werden.

Rein äusserlich fehlen der Mathematik des 17. Jahrhunderts alle wesentlichen abstrakten Konzepte wie Vektorräume, Eigenwerte, Anfangsbedingungen, die es erlauben die unendlich vielen Freiheitsgrade der Saitenbewegung durch eine geometrische Theorie mit unendlichdimensionalen Vektorräumen einzufangen. Weit nahe liegender aus der Sicht mathematischer Verallgemeinerung scheint es, nach dem Studium der Pendelbewegung, vor den unendlichdimensionalen Problemen, Situationen mit zwei oder drei Freiheitsgraden zu untersuchen. Descartes Erklärung der Obertöne weist in diese Richtung. Gemäss Cannon, Dostrovsky ist die späte Nutzbarmachung des Superpositionsprinzip um 1740, darin begründet, dass die Saitenbewegung lange Zeit als Bewegung mit nur einem Freiheitsgrad missverstanden wurde. Man glaubte aus den beiden Bedingungen Periodizität und simultaner Durchgang durch die Nullage, ergebe sich automatisch eine Sinusschwingung. Die dreiecksförmige Auslenkung einer gezupften Saite würde infolge eines Ausgleichsvorganges nach wenigen Schwingungsperioden in einen Sinusbogen übergehen (Taylorsches Paradoxon). Unter dieser Voraussetzung kann eine gezupfte Saite natürlich keine andauernden Obertöne hervorbringen. Dies steht in eklatantem Widerspruch zu den schon von Mersenne beobachteten Obertönen.

1.2.4. Der Dimensionsbegriff

Der Abbildcharakter der Hörwahrnehmung wird von Mersenne problematisiert, indem er die Dimensionen unseres Lebensraums probenhalber auf die Merkmale der Töne überträgt. In diesem Zusammenhang zeigt sich, dass Mersennes Dimension und Qualität sehr eng verwandte Begriffe sind. Die modernen mathematischen Begriffe Dimension, Basis und lineare Unabhängigkeit scheinen sich seinem Raumbegriff zwanglos einzufügen. Falls die von ihm angeführten Begriffspaare zur Charakterisierung von Klangmerkmalen als unabhängig voneinander variierbar zu verstehen sind, lässt sich daraus eine mehr als dreidimensionale Struktur ableiten. Beachtet man, dass schon Viète in mehr als dreidimensionalen Strukturen gedacht hat und nimmt zur Kenntnis, dass Descartes zur Zeit

von Mersennes *Harmonie universelle* (*Géometrie*, 1637) den Begriff *sursolide* – ohne es für nötig zu befinden, ihn zu definieren –, in genau diesem Sinne verwendet, ist man versucht den Ursprung der Vorstellung des Tons bzw. der Qualitäten des Tones als multidimensionale Eigenschaften ins 17. Jahrhundert zu datieren. Mersennes Dimensionsbegriff ist mit demjenigen der Klangfarbenräume, die heute mit Hilfe multidimensionaler Skalierung erforscht werden, so z.B. am Ircam, weitgehend kompatibel [vgl. Kap. 7.4]. Allerdings ist Mersennes räumliche Deutung eine rein psychologische, indem sie mit Ausnahme von Lautstärke, Tonhöhe und Rauigkeit keinen direkten Bezug auf die physikalischen Eigenschaften des Schalles als schlagende Luftbewegung nimmt. Das heisst nicht alle Wahrnehmungsparameter werden auch physikalisch gedeutet.

Denkt man die Töne als Objekte im Raum von Einsatzzzeit und Tonhöhe, erhalten die französischen Tonhöhenbegriffe *grave* und *aigu* eine sehr anschauliche Bedeutung, die mit der Korpuskeltheorie im Einklang steht. Der physikalische Begriff des Massenpunktes als Stellvertreter eines Körpers im Gravitationsfeld bietet sich als Metapher für den Ton einer bestimmten Frequenz an. Die weiteren Eigenschaften wie Rauigkeit, Helligkeit könnten solchen Tonobjekten als akzidentielle Qualitäten zugewiesen werden. Diese affizieren nicht die Position im Tonraum, sondern sie sind vektorielle Qualitäten, die an diese Positionen gebunden sind (Ortsvektoren). Die Deutung der Töne als mehrdimensionale Objekte der Wahrnehmung, die selbst in einem Raum aus Zeit und Tonhöhe beheimatet sind, scheint damit parallel mit der Metrisierung des Raumes durch Descartes' Koordinatensysteme zu gehen und findet ihre Vertiefung in der im Entstehen begriffenen, darin anzusiedelnden „klassischen“ (Newtonschen) Mechanik.

Auf der andern Seite impliziert die Vorstellung des Tons als dynamische Qualität, das Schlagen der Luft (*battement de l'air*), via Substantivierung die Objektivierung einer Bewegung. Mathematisch unlösbar verknüpft sind damit die Begriffe *Kurve* und *Funktion*, die sich bei Descartes abzeichnen. Die Kurven erlangen in der Mathematik den Status von Objekten, und sie sind repräsentiert durch ihre Gleichung. Unter dieser Voraussetzung erst wird es möglich Töne physikalisch-mathematisch zu charakterisieren und zu klassifizieren. Die Prozesse, das heisst die Schallsignale selbst als Objekte in mathematischen Räumen zu interpretieren, ist der Abstraktionsschritt, den das 17. Jahrhundert noch nicht vollzieht. Er erlaubte es, die zusammengesetzte Natur des Tons, als Einheit in der Vielheit seiner Teiltöne mathematisch sinnfällig zu interpretieren, der Ton ist ein Punkt im Raum der Obertonkoordinaten, die Koordinaten entsprechen den Partialamplituden, die Teiltöne selbst ergeben sich als Projektionen. Die analytische Sicht auf den Klang bestimmt dabei über die Projektionen die Obertonkoordinaten (Nummer und Intensität), die synthetische versteht den Ton als Punkt oder *Monade* im Sinne von Leibniz. Schönberg scheint in seiner Harmonielehre 1911 mit „die Klanghöhe ist Klangfarbe gemessen in einer Richtung“ auf eine solches Verständnis anzuspielen [vgl. Kap. 7.1].

Mehrdimensionale Zahlen

Die Untersuchungen zur Lösbarkeit polynomialer Gleichungen führte Descartes auch zur Verwendung komplexer Zahlen, „Zahlen“ also die selbst zweidimensional sind und die geometrisch als Punkte in der sogenannten komplexen Zahlenebene gedeutet werden können. Die gewöhnlichen Zahlen sind darin nur eine Teilmenge. Eine zweidimensionale Veranschaulichung der komplexen Zahlen findet sich bei Descartes allerdings noch nicht. Zu einer Zeit, wo sogar der Existenzstatus der negativen Zahlen noch umstritten war, werden also nicht nur mehrdimensionale Raumstrukturen sondern auch mehrdimensionale Zahlen untersucht!

Die komplexen Zahlen sind ein wichtiges Hilfsmittel der modernen Analysis, insbesondere auch für die Theorie der Integraltransformationen (wie beispielsweise der Fouriertransformation), wo der Übergang zu den komplexeren Zahlen zu kompakteren Formeln führt. Verwendet man Polarkoordinaten erlauben sie, zyklische Strukturen adäquat zu beschreiben [vgl. Kap. [7.7](#)]

1.3. Mathematik und Schwingungslehre

Die Umgestaltung der Mathematik zu einer Theorie, die dynamische Modelle zu raumzeitlichen Zusammenhängen zur Verfügung stellt, braucht dem Gedanken der *harmonie universelle* nicht zu widersprechen. Das Bestreben, die Welt in einfache, griffige Formeln zu packen erlangt seine Seriosität und Wissenschaftlichkeit durch die Fortschritte in der Messtechnik, womit die Korrespondenz von Wirklichkeit und mathematischem Modell induktiv erwiesen werden soll. Verfeinerung der Messtechnik und Verfeinerungen der Theorien bedingen sich dabei gegenseitig. So führt die Verwendung des Fadenpendels auf Basis des Pendelgesetzes zu einer verbesserten Zeitmessung. Die verbesserte Zeitmessung zeigt aber gleichzeitig auch die Grenzen des Pendelgesetzes. Seine Gültigkeit nur für kleine Auslenkungen gibt Anlass zur Erfindung anderer schwingender Systeme als verbesserte Zeitgeber wie das Zykloidenpendel.

Dass dabei unter dem bestehenden „Wissensstand“ verschiedene Paradigmen über die Natur der Sinneswahrnehmung im 17. Jahrhundert nicht oder erst allmählich zum Widerspruch führen, stellt ein Modellbeispiel für die Theorie wissenschaftlicher Umwälzungen dar.

Die Mathematik und Physik der ersten Hälfte des 18. Jahrhunderts ist geprägt durch die Verarbeitung der Newtonschen Ergebnisse und Theorien. Die im ausgehenden 17. Jahrhundert entdeckten Zusammenhänge der Infinitesimalrechnung durch Leibniz und Newton bilden die Grundlage einer soliden mathematisch-physikalischen Schwingungslehre, deren Ergebnisse anhand akustischer Phänomene verifiziert werden können. Die Verifikation erfolgt dabei über das Gehör, über das Auge und über den Tastsinn. Dass es Daniel Bernoulli gelingt, Superposition mehrerer simultaner Schwingungsmoden – am einseitig eingespannten schwingenden Stab – zu sehen, die mit seinen theoretischen Berechnungen übereinstimmen, ist entscheidend für den Erfolg seines Ansatzes und für die Plausibilität der Deutung des Obertonphänomens als additive Überlagerung von Teiltönen.

Zweck einer allgemeinen Schwingungslehre ist nicht nur die Erklärung beobachteter Phänomene mittels mathematisch-physikalischer Modelle, sondern auch ihre Brauchbarkeit für Prognosen: Aus den Materialeigenschaften und Dimensionierung des schwingenden Stabes oder der schwingenden Membran sollen die möglichen Schwingungen berechnet werden können.

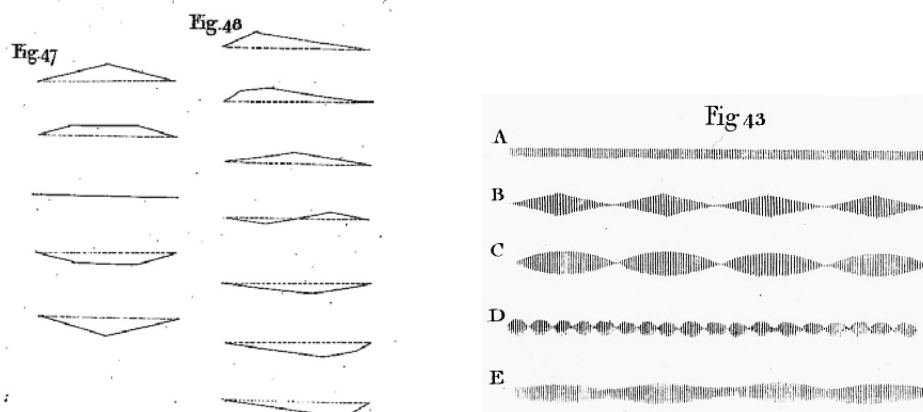
Die Präferenz für einfache Formeln zur Erklärung der Welt, die im 17. Jahrhundert festgestellt wurde, gilt in gewissem Sinne auch für das 18. Jahrhundert. Die verbreitete Annahme, die ideale Saite sei ein schwingendes System mit nur einem Freiheitsgrad, ist Ausdruck dieses Glaubens an die rationale Einfachheit der Welt und wird erst durch die erwähnte Beobachtbarkeit mehrerer simultaner Schwingungsmoden in Frage gestellt. Vor einer solchen Beobachtung scheint die Postulierung einer höherdimensionalen oder gar unendlichdimensionalen Theorie des Tones inadäquat. Bernoullis Ansatz zur Erklärung des Obertonphänomens basiert auf der Annahme, dass Pendelschwingungen, das heisst Sinusschwingungen, die natürliche Form einer Schwingung darstellen. Und die einfachste

Kombination solcher Elementarschwingungen ist ihre „ungestörte“ Überlagerung in Form der mathematischen Summe.

Auf Basis der Newtonschen Gesetze und der Infinitesimalrechnung, die etwa zeitgleich von Leibniz und Newton entwickelt wurde, werden in der ersten Hälfte des 18. Jahrhunderts verschiedenartige schwingende Systeme erforscht. Entscheidend für den Höhepunkt mathematischer Schwingungsanalyse um die Jahrhundertmitte durch Daniel Bernoulli und Leonhard Euler ist die Nutzbarmachung des Superpositionsprinzips. Um 1740 beobachtet Daniel Bernoulli, wie bereits erwähnt, erstmals von Auge die Superposition von Schwingungen mit verschiedener Frequenz, und zwar an einer einseitig befestigten Nadel (schwingender Stab), nicht an der schwingenden Saite. Damit löst sich der Widerspruch um die von Mersenne bemängelte Sichtbarkeit der Obertöne – wenigstens in einer verwandten Situation – auf.

Während für die Mathematik des ausgehenden 17. Jahrhunderts unser Augenmerk der Objektwerdung der Funktionen galt, kann nun davon ausgegangen werden, dass *unbekannte Funktionen* zum Rüstzeug der Mathematiker gehört. Ebenso sind die Verfahren Integration und Differentiation verfügbar. Die Bestimmung der allgemeinen Bewegung der Saite aus ihrer Anfangsauslenkung ist eine derartige Aufgabe, bei der es gilt eine unbekannte Funktion in zwei Variablen (Ort auf der Saite und Zeit), aufgrund ihrer Differentialgleichung, zu finden. Differentialgleichungen treten immer dann auf, wenn bei unbekannter Funktion Ortsabhängigkeiten mit Geschwindigkeits- oder Beschleunigungsverhalten in Beziehung gesetzt werden, denn Geschwindigkeits- und Beschleunigungsfunktionen sind die zeitlichen Ableitungen der Ortsfunktionen.

Die Restriktionen der allgemeinen Lösung als Funktion von Ort und Zeit auf Funktionen in einer Variablen heisst, die Gestalt der Saite zu jedem Zeitpunkt in einem sogenannten „Ortsbild“ zu bestimmen oder für jeden Punkt der Saite seine Position in Abhängigkeit der Zeit als „Zeitbild“ zu beschreiben. Allgemein lässt sich eine Funktion zweier Variablen als Fläche im Raum veranschaulichen. Orts- und Zeitbilder sind darin Schnittebenen orthogonal zur Orts/Zeit-Ebene. Die Bewegung der Saite kann also als Funktionenschar von Zeitbildern oder als Funktionenschar von Ortsbildern beschrieben werden. Dreidimensionale Darstellungen von Funktionsgraphen als Flächen sind in dieser Zeit noch nicht gebräuchlich [vgl. die Landschaftsdarstellung von Grey 1975, Kap. [8.4.3](#)].



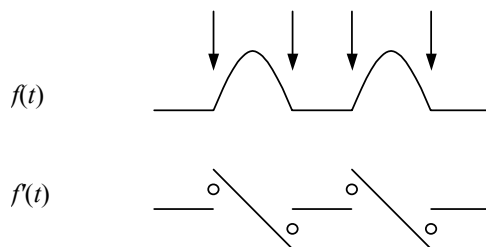
Orts- und Zeitbilder. Links: Ortsbilder – verschiedene Phasen innerhalb einer halben Periode – der gezupften Saite bei Thomas Young. Die Saite wird aus der ausgelenkten Lage in Ruhe losgelassen: Fig. 47, wenn sie in der Mitte, Fig. 48, wenn sie in der Nähe ihres Endes gezupft wird. Das Phasenbild in Fig. 48 ist rotations- und nicht spiegelsymmetrisch. Die Darstellungen beruhen gemäss Young auf der

Theorie von La Grange und Euler. Sie stimmen mit denjenigen von Helmholtz überein [Helmholtz 1898, 114-121].

Rechts: verschiedene Zeitfunktionen – Auslenkung eines Luftteilchens als Funktion der Zeit. A Sinusschwingung, B Schwebung zweier Dreiecksschwingungen, C Schwebung zweier Sinusschwingungen, D schnelle Schwebungen die gemäss Young zur Wahrnehmung eines *fundamental harmonic* führen. E: unvollkommene Schwebung auf Grund verschiedener Amplituden. [Quelle: Young 1800, Plate 6 (149)]

Daniel Bernoulli und Leonhard Euler geraten sich ob der allgemeinen Lösung der Schwingungsgleichung in die Haare. Die im folgenden *Bernoullis Vermutung* genannte Behauptung besagt, dass sich die Zeitfunktionen ebenso wie die Ortsbilder als trigonometrische Reihen beschreiben lassen. Dabei kann es vorkommen, dass unendlich viele solcher Komponenten benötigt werden.

Bernoullis Vermutung ist also nichts anderes als das in der Mathematik bekannte Theorem von Fourier (1822) für periodische Funktionen. Leonhard Euler gibt als Gegenbeispiel eine periodische Impulsfunktion mit Knickstellen:



Gegenbeispiel Leonhard Eulers gegen Daniel Bernoulli. Die Ableitung $f'(t)$ der Impulsschwingung $f(t)$ weist an den Knickstellen von $f(t)$ eine Unstetigkeit auf. Die zugehörige trigonometrische Reihe, die Fourierreihe, konvergiert an diesen Sprungstellen nach Dirichlet (1826) gegen den durch Kreise symbolisierten Mittelwert von links- und rechtsseitigem Grenzwert. Für $f(t)$ ist an diesen Stellen keine Ableitung definiert.

Eine Analyse des Gegenbeispiels unter Zuhilfenahme der präzisierenden Erweiterung des Satzes von Fourier durch Dirichlet 1826 zeigt, dass zu seiner Darstellung unendlich viele Teiltonkomponenten erforderlich sind und dass die Approximation der Impulsfunktion durch ihre Teiltonkomponenten an allen Stellen gegen die Impulsfunktion konvergiert, auch an den Knickstellen. Darüber hinaus konvergiert die Ableitung der Fourierreihe an den Knickstellen gegen den Mittelwert der links- und rechtsseitigen Ableitungen der Impulsfunktion. An den Knickstellen aber hat die Impulsfunktion keine eindeutige Ableitung.

Zusammenfassend lässt sich damit sagen, Eulers Gegenbeispiel ist gültig, wenn für „Gleichheit“ der Funktionen verlangt wird, dass im Definitionsbereich nicht nur die Funktionswerte übereinstimmen, sondern auch die Ableitungen. Bernoullis Vermutung ist richtig, wenn über die Ableitungen keine Voraussetzungen gemacht werden. Der Streit zwischen den beiden Wissenschaftlern löst sich daher in zwei verschiedene Weisen, die Wirklichkeit zu modellieren, auf. Gleichheit der Ableitung der Zeitfunktion eines Teilchens, bedeutet, dass in der Modellierung auch die Geschwindigkeitsfunktionen übereinstimmen.

Für Eulers spätere Beschäftigung mit Schwingungen in Orgelpfeifen hat dies zur Konsequenz, dass er im Vornherein von jeglicher spektraler Zusammensetzung eines periodischen Signals absieht – Bernoullis überlagerte Sinustöne sind ja nur ein Sonderfall – und eine reine Zeittheorie entwickelt. Periodische Schwingungen einer Saite oder einer Pfeife

werden dabei als stehende Wellen, das heisst als Überlagerung einer links- und einer rechtslaufenden Welle, die an ihren Enden periodisch reflektiert werden, angesehen. Problematisch ist für Euler demgemäss auch die von Bernoulli proklamierte Gleichsetzung von Tönen und Sinusschwingungen – das spätere „Ohmsche Gesetz der Akustik“. In letzter Konsequenz erklärt Euler die Superposition als allgemeines Prinzip der Summation von Wirkungen und nicht auf Sinusschwingungen begrenzt, wenn nur vernachlässigbar kleine Amplituden auftreten. Eulers Zeittheorie führt ihn ferner zu einer Erklärung der Vokale, die mit einer Formanttheorie nicht unverträglich ist [vgl. Kap. 3.3.4]. In diesem Zusammenhang stellt sich die Frage nach der Sonderrolle der Sinusschwingung unter den periodischen Funktionen allgemein in Mathematik und Physik und insbesondere im 18. Jahrhundert.

1.3.1. Die Sinusschwingung und ihre Rolle als Ton

Cannon et al. weisen nachdrücklich darauf hin, welche mathematischen Techniken und Begriffe dem frühen 18. Jahrhundert noch **nicht** zur Verfügung stehen:

Not only were dynamical equations unavailable in the period under consideration [1687-1742] but there was no systematic notion of linear analysis nor of the associated concepts such as eigenvalues, eigenvectors, modes, superposition and so on. [Cannon et al. 1981, 4-5]

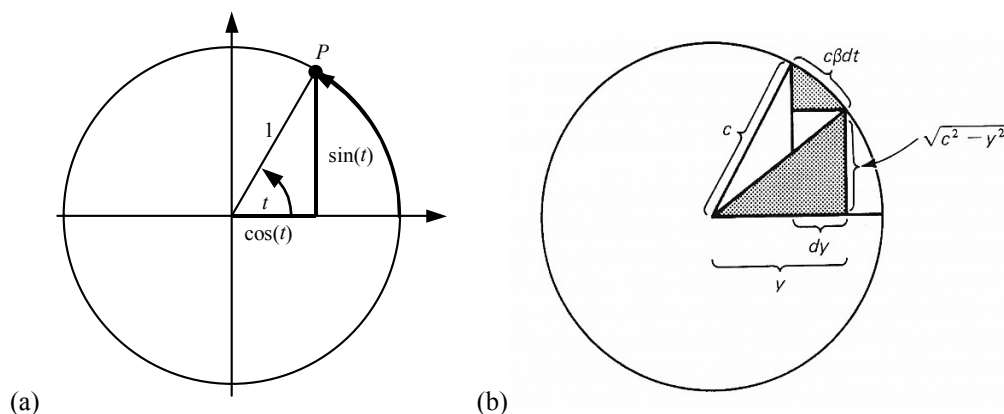
Insbesondere wurde die Sinusfunktion noch nicht als periodische Funktion verstanden, denn Winkel grösser als 2π verschliessen sich einer statischen, geometrischen Deutung [Cannon et al. 1981, 3]. Während sich durch Studium der gleichförmigen Drehbewegung am Einheitskreis mit modernen Hilfsmitteln die Sinusschwingung unmittelbar als Projektion auf die Koordinatenachsen ergibt und zur Gleichung

$$y = \sin(\beta t + \delta)$$

führt (siehe untere Abb. a), kann die korrespondierende differentielle Gleichung

$$dy = \beta \sqrt{c^2 - y^2} dt$$

durch elementar geometrische, aber nicht einfach nachvollziehbare Überlegung aus Abb (b) gewonnen werden.



(a) Gleichförmige Drehbewegung am Einheitskreis. Der Winkel im Bogenmass von der horizontalen im Gegenuhrzeigersinn wird mit der Zeit t identifiziert. Die y -Komponente des Punktes P ist dann zu jedem Zeitpunkt $y = \sin(t)$ und die x -Komponente $x = \cos(t)$, das heisst die Drehbewegung kann als Überlagerung zweier zu einander orthogonaler Sinusschwingungen zur Periode 2π gedeutet werden. Mehrere Umdrehungen können dadurch erfasst werden, dass man Winkel als gerichtete Grössen versteht, die auch grösser als 2π ($=360^\circ$) werden dürfen.

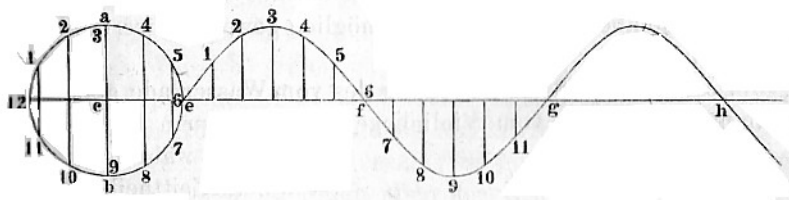
(b) Die differenzielle Gleichung $dy = \beta \sqrt{c^2 - y^2} dt$ beschreibt den Zusammenhang zwischen örtlicher und zeitlicher Veränderung der gleichförmigen Drehbewegung eines Punktes mit Winkelgeschwindigkeit β . Wenn die Gleichung durch dt dividiert wird, beschreibt sie die y -Komponente der Momentangeschwindigkeit (dy/dt) als Funktion der momentanen Auslenkung y . Die obere Gleichung dagegen beschreibt die y -Auslenkung direkt als Funktion der Zeit. Indirekt wird sie aus der unteren Gleichung durch Integration erhalten. [Quelle: Cannon et al. 1981, 3]

1.3.2. Mathematische Eigenschaften der Sinusschwingung

Sinusschwingungen sind periodische Veränderungen der Auslenkung einer eindimensionalen Grösse, im Falle des Schalls des Luftdrucks, als Funktion der Zeit.

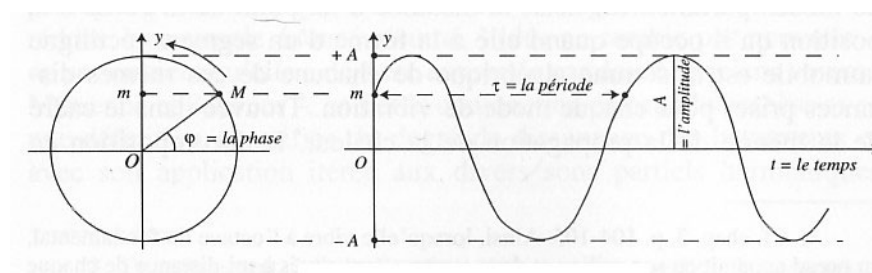
Die Sinusschwingung entsteht durch Projektion einer gleichförmigen Drehbewegung in der Ebene auf eine beliebige Achse durch den Kreismittelpunkt. Umgekehrt kann die Kreisbewegung als Spezialfall einer zweidimensionalen Überlagerung zweier gerichteter Sinusschwingungen gleicher Frequenz und gleicher Amplitude mit gedeutet werden. Thomas Young [1800] untersucht derartige Überlagerungen systematisch, Descartes am Beispiel der schwingenden Saite [vgl. Kap. 2.4.3].

Die gleichförmige Drehbewegung (konstante Drehgeschwindigkeit) gilt in der klassischen Physik neben der geradlinig gleichförmigen als einfachste Bewegung eines Körpers.



Zusammenhang zwischen gleichförmiger Drehung und Sinusschwingung. [Quelle: Helmholtz 1863, 35]

Bezüglich eines willkürlich gewählten Nullpunkts der Zeitmessung ist eine Sinusschwingung durch Frequenz, Amplitude und Nullphase eindeutig bestimmt:

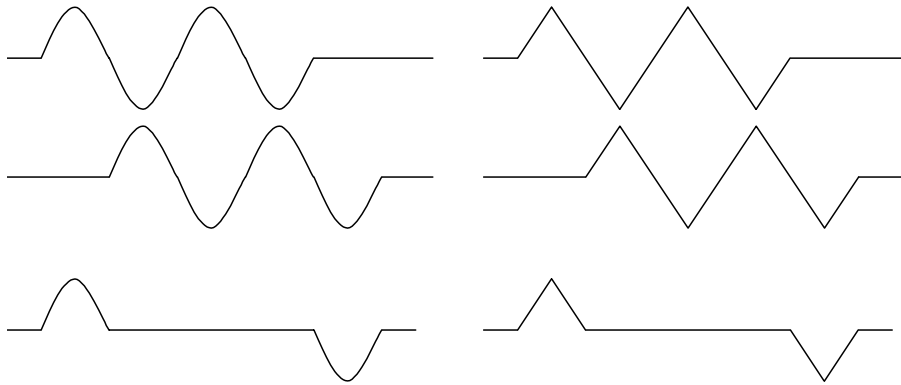


Zusammenhang zwischen Periodizität (Kehrwert der Frequenz), Amplitude und Phase [Quelle: Bailhache 2001, 146]

Die Superposition zweier Sinusschwingungen gleicher Frequenz ergibt wiederum eine Sinusschwingung mit gleicher Frequenz:

$$A_1 \sin(2\pi \cdot a \cdot t + \varphi_1) + A_2 \sin(2\pi \cdot a \cdot t + \varphi_2) = A_3 \sin(2\pi \cdot a \cdot t + \varphi_3) ,$$

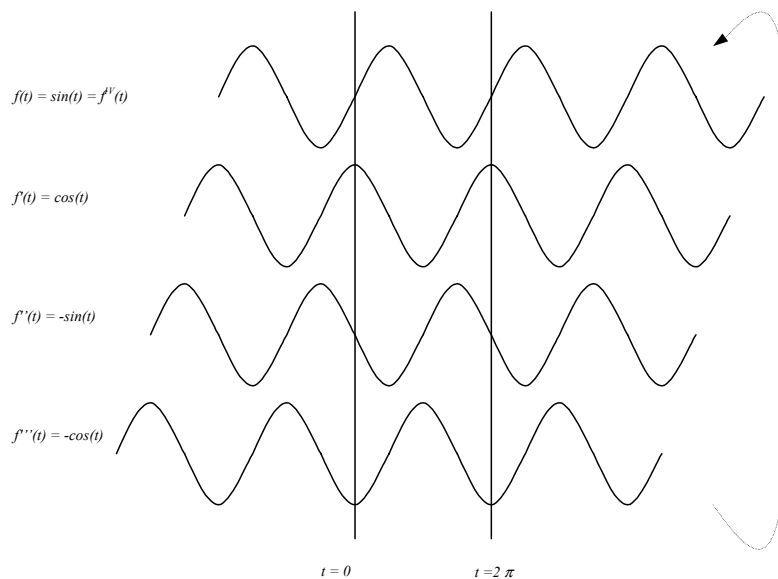
dabei bedeuten $A_i \geq 0$ die Amplituden, t die Zeit, a die Frequenz und φ_i die Nullphasen und es gilt $|A_1 - A_2| \leq A_3 \leq A_1 + A_2$. Bei gleichen Phasen der Eingangsschwingungen gilt $A_3 = A_1 + A_2$ und $\varphi_3 = \varphi_1 = \varphi_2$. Bei gleichen Amplituden und einem Phasenunterschied π tritt Auslöschung auf, denn $\sin(2\pi \cdot a \cdot t + \pi) = -\sin(2\pi \cdot a \cdot t)$.



Überlagerung zweier endlicher, um einen Phasenunterschied von ($\pi = 180^\circ$) versetzter Sinusschwingungen. Während des gemeinsamen Schwingens löschen sich die beiden Töne aus. Auslöschung ist nicht an die Sinusform gebunden. Alle punktsymmetrischen Schwingungen, z.B. Dreiecks- oder Parabelschwingungen können bei geeigneter Phasenlage zur Auslöschung gebracht werden.

Sinusschwingungen sind beliebig oft differenzierbar, alle Ableitungen sind selbst wiederum Sinusschwingungen. Für einen sinusförmig schwingenden Massenpunkt bedeutet dies, dass sich nicht nur seine Position, sondern auch seine Momentangeschwindigkeit und seine Momentanbeschleunigung sinusförmig ändern.

Beim Differenzieren der Sinusschwingungen geht also keine Gestaltinformation verloren. Im Vergleich dazu verschwindet die $n+1$ -te Ableitung einer Polynomfunktion n -ten Grades, denn bei jeder Differentiation nimmt der Grad eines Polynoms um eins ab. Polynome vom Grad eins oder höher sind nicht periodisch. (Die Polynome 0-ten Grades, die konstanten Funktionen können als periodisch zu einer beliebigen Periode angesehen werden.)

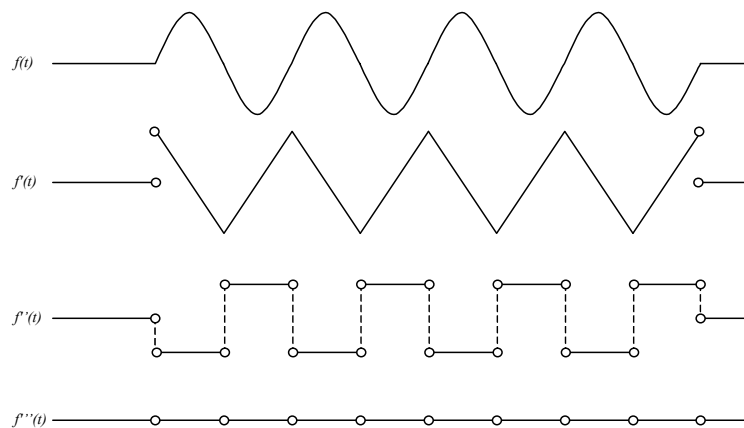


Differentiation der Sinusschwingungen. Die vierte Ableitung hat die gleiche Nullphase wie die Ausgangsschwingung. Jede Ableitung bewirkt eine Verschiebung der Sinusschwingung um $\pi/2 = 90^\circ$ nach links. Bei Sinusschwingungen $f(t) = \sin(\nu t)$ mit beliebiger Frequenz ν verändert sich bei der Differentiation die Amplitude: $f'(t) = \nu \cos(\nu t)$, $f''(t) = -\nu^2 \sin(\nu t)$, $f'''(t) = -\nu^3 \cos(\nu t)$ und $f^{IV}(t) = \nu^4 \sin(\nu t) = \nu^4 f(t)$, das heisst die Signale erleiden eine Streckung in Amplitudenrichtung, aber ihre sinusförmige Gestalt bleibt erhalten.

Stückweise polynomiale Schwingungen sind an den Übergangsstellen nicht beliebig oft differenzierbar. So ist eine Dreiecksschwingung (stückweise polynomial ersten Grades) an den Knickstellen zwar noch stetig, aber nicht differenzierbar, eine Rechtecksschwingung (stückweise polynomial nullten Grades) ist an den Sprungstellen nicht stetig und in der klassischen Physik, der kontinuierlichen Weltansicht, als physikalisch unmöglich anzusehen, da jede Ortsveränderung eines Massenpunkts Zeit benötigt. Auch eine Dreiecksschwingung ist physikalisch unmöglich. Die Geschwindigkeitsfunktion einer Dreiecksschwingung ergibt nämlich eine Rechtecksschwingung, das heisst die Geschwindigkeit müsste sprunghaft ändern; dies wird von Thomas Young erkannt [vgl. Kap. 4.2.1]

Eine stückweise parabolische Schwingung mit „glatten“ Übergängen ist an den Übergangsstellen genau einmal differenzierbar. Die Geschwindigkeit ändert sich kontinuierlich, aber die Beschleunigung sprunghaft. Auch dies könnte „unmöglich“ sein ... Von Auge ist aber eine solche parabolische Schwingung kaum von einer Sinusschwingung zu unterscheiden!

[Mit stückweise polynomialen Schwingungen lassen sich Basissysteme für periodische Schwingungen genauso wie mit Sinusschwingungen definieren. Die zugehörigen Koordinatensysteme sind unter der üblichen Metrik im Raum der quadratisch integrierbaren Funktionen *nicht* orthogonal. Umwandlungen zwischen polynomialen und sinusförmigen Basissystemen können mit Hilfe von dreiecksförmigen Toeplitz-Matrizen (Matrizen mit unendlich vielen Zeilen und Spalten) vorgenommen werden, vgl. Muzzolini 1985. Derartige Systeme realisieren das von Leonhard Euler (gegen Daniel Bernoulli) vorgebrachte allgemeine Superpositionsprinzip [Kap. 3.1.6]. Berücksichtigt man nur endlich viele polynomiale bzw. sinusförmigen Teiltöne, haben die von ihnen erzeugten Vektorräume aus Differenzierbarkeitsgründen trivialen Durchschnitt.]



Stückweise polynomiale Schwingungen (Splineschwingungen) und ihre Ableitungen. Die aus Parabelbögen zusammengesetzte Schwingung $f(t)$ wird bei der Differentiation zur Dreiecksschwingung, die Dreiecks- zur Rechtecksschwingung, und die Rechtecksschwingung zur konstanten Funktion mit periodischen Definitionslücken.

Das Studium der Ableitungen auf Zeitfunktionen angewandt stiftet die Zusammenhänge zwischen den Grundbegriffen, Ort, Geschwindigkeit, Beschleunigung, ... Die Saitengleichung, wie sie von d'Alembert, Euler und Daniel Bernoulli in der Mitte des 18. Jahrhunderts auf Grund der Gesetze der Newtonschen Mechanik aufgestellt wird, stiftet einen Zusammenhang zwischen Orts- und Zeitableitungen in Form einer partiellen Differentialgleichung.

1.3.3. Sinusschwingung und Pendelschwingung

Die Begriffe Sinusschwingung und Pendelschwingung werden bei Helmholtz als gleichbedeutend angesehen. Bereits im 17. Jahrhundert wurde aber bekannt, dass die von Galileo Galilei behauptete Unabhängigkeit der Schwingungsdauer eines Fadenpendels von der Anfangsauslenkung nur für kleine Auslenkungswinkel zutrifft und die Periodizität des Pendels bei größeren Winkeln grösser wird.

Galileo Galileis Vergleich der Pendelschwingung mit der Bewegung der Saite in den *Discorsi intorno a due nuove scienze* 1638 [vgl. Bailhache 2001, 66] ist also unvollkommen, denn die Isochronizität der Saitenschwingung ist als Konstanz der Tonhöhe erfahrbar und wird im Allgemeinen nicht in vergleichbarer Weise angezweifelt [vgl. aber Mersenne 1636: Kap. 2.4.4, Diderot 1749: Kap. 3.1.10]. Zur Verbesserung des Gleichlaufs von Uhren wurde das Zykloidenpendel erfunden. Bei einem Zykloidenpendel ist die Schwingungsdauer unabhängig von der Anfangsauslenkung, denn mit zunehmender Auslenkung wird die freie Fadenlänge zunehmend verkürzt. Das heisst die allmähliche Verminderung der Auslenkung durch den Luftwiderstand führt nicht zu einer Veränderung der Frequenz. Auf Grund ihrer Isochronizität überträgt Huygens 1673/74, die Zykloidenschwingung auf die Bewegung der Saite [Mahony www, Sketching Science in the 17th Century, 10-12]. Vor diesem Hintergrund wird es verständlich, dass Smith [1749] neben der Sinusschwingung, auch die Zykloidenschwingung als mögliche *natürliche* Bewegung der Saite in Erwägung zieht [vgl. Kap. 3.1.7].

1.3.4. Das Theorem von Fourier in seiner Anwendung auf die Musik

Während die naturwissenschaftliche Auseinandersetzung mit dem Klangcharakter des Tons im 17. und 18. Jahrhundert zu einem Grossteil in französischer Sprache geführt wird, kommen im 19. Jahrhundert zunehmend wesentliche Impulse auch aus dem deutschen Sprachraum.

Die erstmalige Anwendung der Berechnungsmethode von Fourier auf die Akustik erfolgt 1843 durch Ohm. Ähnlich wie im Streit zwischen Daniel Bernoulli und Leonhard Euler spricht in der Auseinandersetzung zwischen Ohm und Seebeck die Zeittheorie das letzte Wort, aber unter einem anderen Betrachtungswinkel.

Während Euler nämlich Bernoullis Vermutung bei seinen Modellierungsannahmen widerlegt, gelangt Seebeck durch Fourieranalyse von periodischen Impulsfunktionen zur Feststellung, dass die Partialamplitudenverhältnisse nicht die wahrnehmbare Grundtondominanz der Sirenentöne erklären, wenn die Sinusschwingungen den wahrgenommenen Teiltönen entsprechen. Das „Ohm'sche Gesetz der Akustik“ *Elementarton = Sinusschwingung* scheint dadurch widerlegt. Im Unterschied zur eher theoretischen Auseinandersetzung zwischen Daniel Bernoulli und Leonhard Euler steht somit, zumindestens für Seebeck, der sensorische Aspekt im Vordergrund. Er beobachtet nämlich eine unauflösbare Inkongruenz zwischen der „objektiven“ Zusammensetzung des Schalls aus Sinusschwingungen und den wahrnehmbaren Teiltonstärken.

Die Auffassung von Ohm, welche die Sinustöne im Lichte des Satzes von Fourier als elementare Wahrnehmungsobjekte ansieht, kann durch folgende drei Thesen zusammengefasst werden:

- Eine elementare Tonempfindung gehört zu einem periodischen Schalldruckverlauf
- Eine Sinusschwingung verursacht eine elementare Tonempfindung
- Eine nicht sinusförmige Schwingung verursacht eine zusammengesetzte Empfindung, die als Vielheit von Tönen erfahrbar ist.

Klänge mit inharmonischen Bestandteilen (quasi-periodische Klänge) können gemäss der ersten These keine elementare Tonempfindung auslösen.

Die zweite These wird durch das Vorkommen von subjektiven Obertöne widerlegt, wenn die Schwingung der Schallquelle oder der Schalldruckverlauf in der Luft als Referenz genommen wird. Subjektive Obertöne werden von Helmholtz und Koenig diskutiert, sie können bei grossen Amplituden zwischen Trommelfell und Schnecke entstehen. Vorausgesetzt die Amplituden sind so klein, dass bei der Übertragung keine wesentliche Formveränderung stattfindet, gilt die zweite These heute als akzeptiert.

Die dritte These schliesst andere Schwingungsformen als elementare Wahrnehmungsobjekte aus. Sie wird von Seebeck bestritten.

Folgt man Seebeck und lässt auch nicht sinusförmige Schwingungen als Elementartöne zu, ist eine spektrale Beschreibung der Klangqualität solcher Töne möglich. Eine solche Deutung lässt sich entgegen Lindsays Auffassung [Lindsay 1966, 639] bei Ohm nicht nachweisen, die spektrale Deutung unter Voraussetzung des Ohmschen Gesetzes findet sich erst bei Brandt und Helmholtz. Bei Seebeck hingegen findet sich die Gleichsetzung von Schwingungsform und Klangqualität.

Das Amplitudenspektrum zusammen mit den Phasenrelationen bilden eine zum Schalldruckverlauf äquivalente Beschreibung eines periodischen Klangs. Die Frage ist nur,

ob diese alternative Beschreibung eines Tons, die dem Hörvorgang adäquatere Beschreibung ist als der Schwingungsverlauf selbst. Vom Gesichtspunkt der mathematischen Bequemlichkeit wäre es äusserst vorteilhaft, wenn die Klangqualität eines Tons nicht von den Phasenrelationen abhinge. Es sind dann nur noch halb so viele Kennzahlen zur verlustfreien Charakterisierung erforderlich, das heisst bei einer räumlichen Deutung vermindert sich die Dimensionszahl um die Hälfte. Und die Ausweitung des Tonbegriffs auf quasi-periodische Klänge, wie sie beispielsweise bei realen Saiten während ihres stationären Zeitabschnitts oder bei realen Orgelpfeifen auftreten ist unproblematisch. Allein Seebeck nimmt an dass, dass die Tonempfindung bei gleichem Amplitudenspektrum von den Phasenrelationen, das heisst von der Form der Schwingung, abhängt. Seine Argumentation mit einzeln je unhörbaren Teiltönen, die zusammen dennoch die Wahrnehmungsschwelle übersteigen und dadurch den Grundton verstärken, basiert wesentlich auf der Gleichphasigkeit der zusammenwirkenden Teiltöne. Die dabei entstehenden steilen Flanken oder starken Maxima im Signalverlauf könnten seiner Vorstellung zu Folge auch bei grundfrequenzfreien Klängen zur einer Empfindung der Periodizität entsprechenden Tonhöhe führen. Seebeck sieht in der Fourieranalyse primär ein zusätzliches Beschreibungswerkzeug für Signalverläufe, ihre Relevanz für die Empfindung wäre erst zu erweisen. Insgesamt sind Euler und Seebeck beide Vertreter einer Zeittheorie, wonach die Klangqualität in der geometrischen Gestalt der Schwingung verborgen ist. Eine historische Würdigung des Satzes von Fourier einschliesslich Simulationen historischer Versuche ist in Barkovsky [1996] zu finden.

Von Beeckman bis Seebeck

2. 17. Jahrhundert: Kaleidoskop und *harmonie universelle*

Am Ausgangspunkt der Quellenanalyse stehen Praetorius und das Dreigespann Mersenne, Beeckman, Descartes, die paarweise mit einander korrespondierten. Mersenne befragte Beeckman und Descartes zur Deutung des Obertonphänomens und liess ihre Antworten in seine *Harmonie universelle* [1637] einfließen. Descartes schloss mit Beeckman anlässlich seines Militärdienstes in Breda Bekanntschaft und wurde von diesem zur Verfassung des *Compendium musicae* [1619] angeregt. Später im Jahre 1630 brach Descartes den Kontakt zu Beeckman ab und forderte von ihm die Abschrift des *Compendiums* zurück. Auslöser für diesen Schritt war ein Streit über den Einfluss Beeckmanschen Gedankenguts auf Descartes [vgl. Kap. 2.1.4].

Ein bisher von der Musikwissenschaft wenig genutzter Zugang zu Beeckman ist sein seit 1939 gedruckt vorliegendes wissenschaftliches Tagebuch *Loci communes* [1604-1634] in lateinischer und teils flämischer Sprache. Von Interesse ist Beeckmans modellhafte Vorstellung des Tons als periodischer Impulsregen auf das Trommelfell, verursacht aber durch eine *kontinuierliche* Bewegung im klingenden Körper sowie, damit zusammenhängend, seine Koinzidenztheorie der Konsonanz. Insgesamt versteht er seine Forschung als Beitrag an die ihm vorschwebende physikalisch-mathematische Universalwissenschaft.

Praetorius' Ansatz ist derjenige des Praktikers mit Handbüchern für Praktiker. Sein Werk ist ein Fundus, nicht nur was das reichhaltige Musikinstrumentenrepertoire anbelangt, sondern auch was die farbige Sprache anbelangt, in der über diesen Kosmos von Klängen geredet wird.

Für die zweite Hälfte des 17. Jahrhunderts werden Poissons Annex zu Descartes *Compendium* [1668] sowie Beiträge von Wallis [1677], Du Verney [1683] und Dodard [1700] in die Diskussion mit einbezogen.

Die für das 17. Jahrhundert gewählte Gliederung des Themenkomplexes in sieben Unterkapitel hängt mit der Zersplitterung der Fragestellungen in den Quellen zusammen. Die Ansätze treten trotz ihres Zielanspruchs, der *universellen Harmonie* Herr zu werden, nicht in Form einer geschlossenen Theorie in Erscheinung.

Die beiden ersten Unterkapitel handeln von der Ontologie des musikalischen Schalls, vom Daseinsstatus des Tons als Schwingung der Saite und Luftbewegung am Eingang und innerhalb des Gehörs sowie von der Art der Informationsübertragung im Trägermedium.

Im Fokus des dritten Kapitels steht der Dimensionsbegriffs in seiner Anwendbarkeit auf die Musik. Während Praetorius die drei Dimensionen unseres Lebensraums in einer Weise auf ganze musikalische Kompositionen überträgt, bei der die Stimmen einer polyphonen Komposition zu Zeitfäden in einer klingenden Landschaft werden, versucht Mersenne – im Wissen, dass Schall nur die Wahrnehmung von schlagender Luft ist – die Zuschreibung räumlicher Bestimmungsmerkmale von materiellen Gegenständen auf Charakteristika der einzelnen Töne, verstanden als Objekte der Wahrnehmung. Descartes hingegen thematisiert in den *Regulae ad directionem ingenii* [1626/1628 ?] den projektiven Charakter der

Sinneswahrnehmung unter der Voraussetzung einer Korpuskeltheorie für Schall und Licht. Dabei werden die höherdimensionalen Strukturen der Welt beim Hören und Sehen auf die zweidimensionalen Rezeptorflächen der Retina und des Trommelfells abgebildet.

Aus Sicht der modernen Mathematik scheint sich eine „räumliche“ Deutung des physikalischen Phänomens der Teiltonhaltigkeit musikalischer Instrumentaltöne aufzudrängen. Eine solche wird von Descartes in Briefen an Mersenne ansatzweise gegeben, indem er nämlich die Teiltöne als überlagerte Schwingungen eines Massepunkts in unabhängige Raumrichtungen interpretiert und so den Schwingungsraum eines Klangs in unseren Lebensraum einbettet. Instrumentaltöne mit mehr als drei Teiltönen wären in diesem System nur dann erklärbar, wenn es nur eine (konsistente) Täuschung wäre, dass der Lebensraum bloss drei Dimensionen hat. Im Unterschied dazu zerlegt die fourieranalytische Interpretation die eindimensionale Schwingung in selbst wiederum eindimensionale Schwingungen, die alle die *gleiche* Raumrichtung haben. Eine derartige Zerlegung kann als einbettende Zuordnung in einen fiktiven höherdimensionalen Vektorraum, dessen Koordinatenachsen nichts mit denjenigen des Lebensraums zu tun haben, verstanden werden. Das Aufbrechen eines Tons in eine Vielzahl von Konstituenten ist an allen Stellen der Übertragungskette (Schallquelle, Luft, Trommelfell, ..., Hörnerv, Gehirn) zu diskutieren. Während die gleichzeitige Übertragung durch die Luft bei Mersenne mit der Analogie der Wasserwelle beantwortet wird und die Fähigkeit des Menschen verschiedene Tonhöhen auch gleichzeitig hören zu können, noch kaum hinterfragt wird, besteht für ihn die Hauptschwierigkeit darin, die Vielzahl von Tönen als Folge einer einheitlichen Bewegung zu verstehen. Es ist deshalb überhaupt nicht abwegig, die Entstehung der Teiltöne, wenn sie schon nicht gleichzeitig in einer sehr langen Saite „gesehen“ werden können, an die Übertragung der Schwingung in die Luft zu delegieren.

Die Deutung der allgemeinen Bewegung einer Saite als Bewegung mit unendlich vielen Freiheitsgraden wird erst in der Mitte des 18. Jahrhunderts durch Daniel Bernoulli und Leonhard Euler gegeben. Die Bewegung der idealen Saite wird dabei als Lösung einer Differentialgleichung modelliert. Es geht dabei darum, die Lösung einer Gleichung mit einer *unbekannten Funktion* zu finden. Aufgestellt wird diese Differentialgleichung unter Voraussetzung der Newton'schen Gesetze der Mechanik. Benötigt für ihre Lösung werden die Techniken der Differentialrechnung, die Ableitungen der Sinustöne und die *mathematische* Superponierbarkeit der Lösungen der Bewegungsgleichung: Gefundene Lösungen können in Form von Summen und Linearkombinationen zu neuen Lösungen der Bewegungsgleichung kombiniert werden.

Du Verney stellt 1683 eine korrespondierende Resonanztheorie der Frequenzverarbeitung bei der Schallrezeption auf, die bis auf technische, in unserem Zusammenhang nicht relevante Details die heutige ist. Allerdings ist für ihn die Frage nach dem Wesen des Tons als simultane Vielheit kein Thema. In seinem primär medizinischen Interesse für das Funktionieren des Gehörs lokalisiert er die höheren und tieferen Frequenzen an verschiedenen Stellen der Cochlea und damit an der Kontaktstelle zum Hörnerv.

Resonanzphänomene werden im 17. Jahrhundert zur Erklärung schallerzeugender und schallrezipierender Vorgänge in vielfältiger Weise beigezogen. Bei Praetorius sind sogar Resonanz und Klangqualität weit gehend gleichbedeutende Begriffe. Die derartige Verwendung des Resonanzbegriffs weist auf eine implizite Trennung in schallerzeugende Schwingung und resonanzbedingte Klangformung hin. Auch im Französischen wird eine

enge Verwandtschaft der Begriffe *résonnance* und *timbre* gesehen, so bei Jaucourt im Artikel *timbre* der *Encyclopédie*, 1765 [vgl. Kap. 3.3.1].

Bei Dodart [1700] ergibt sich in der Anwendung dieser Sicht auf die menschliche Stimme eine bemerkenswert moderne Deutung der Klangqualität, welche die Zusammengesetztheit ihrer Töne bei der Entstehung erklärt. Die symmetrische Deutung der Klangqualität der Vokale aus Sicht des Rezeptionsvorgangs wird erst im 19. Jahrhundert gestützt durch geeignete Synthesemethoden (spezielle Orgelpfeifen, Stimmgabelsynthese) und verbesserte Beobachtungsmöglichkeiten (Resonatoren, Vibrationsmikroskop) vorangetrieben.

Angesichts der Vielzahl präsenter Erkenntnisse ist es merkwürdig, dass ein Zusammenhang zwischen der spektralen Zusammensetzung der Töne und ihrer Klangqualität nicht schon im 17. Jahrhundert mit der gleichen Deutlichkeit ausgesprochen wird wie in der Mitte des 19. Jahrhunderts im Umfeld von Ohm, Seebeck, Brandt und Helmholtz, vor allem auch wenn man in Rechnung zieht, dass die Methode der additiven Schallsynthese in Orgelmixturen längst verwendet wird. Mersenne vermutet einen Zusammenhang zwischen Teiltonreichtum und dem dadurch bewirkten Harmonieempfinden. Praetorius weist auf die Möglichkeit hin, die verlorene Einheit der Quintadena-Pfeife durch geeignete Mixtur wieder herzustellen. Für Rameau [1726] hingegen ist die Vielheit in der Einheit des Tons eine Neuentdeckung.

Schon mit Beeckmans Modell des Tons als periodisches Impulsmuster, lässt sich die Einheit einer Tonmischung aus Vielfachen einer Grundfrequenz sinnfällig mit der Periodizität des überlagerten Impulsmusters begründen [Kap. 2.6.3]. Diese Einheitlichkeit der kombinierten Bewegung stellt gleichzeitig das Kriterium für die bestmöglichen aller Konsonanzen, nämlich der multiplen Proportionen, dar. Dissonanzen hingegen erklären sich mit Beeckmans Koinzidenztheorie [1614] als komplexe beziehungsweise modulierende Impulsmuster. In allen diesbezüglich untersuchten Quellen scheint die Erklärung der Schwebungen auf einer derartigen Koinzidenzauffassung zu beruhen. Trotz dieser einheitlichen Beurteilung stellen die Schwebungen geringfügig verstimmter Konsonanzen bis ins 20. Jahrhundert eine Herausforderung dar, wenn nicht bloss der einfachste Fall des verstimmten Einklangs betrachtet wird. Bezüglich der Beurteilung der Schwebungen ist ihr klangspaltender, desintegrativer Effekt von Interesse. Gefährden Teiltönschwebungen innerhalb eines obertonreichen Instrumentalklangs die Einheit des Tons?

Abschliessend wird die Art des Sprechens über Klangcharakteristika kurz angesprochen. Der Wandel im Sprechen über die „qualitativen“ Bestimmungsmerkmale Töne, ist von besonderem Interesse und verdiente eine gesonderte Untersuchung.

2.1. Definition des Tons

Während Descartes im *Compendium musicae* [1619/1650] die Wesensbestimmung des Tones den Physikern überlässt – sie liegt ausserhalb des Zweckes seiner Untersuchung – und Praetorius durch seine Trennung in Qualität und Quantität eine über Tonhöhe und Zeit hinausgehende quantitative Charakterisierung der Töne auszuschliessen scheint, sind die Ansätze von Beeckman und Mersenne wesentlich an den physikalischen Grundlagen orientiert und beziehen diese auf die Wahrnehmung.

2.1.1. Vieldeutigkeit der Begriffe

Die Einheit des Objekts Ton bzw. Klang durch Definitionen verbal zu erfassen, bietet je nach Paradigma über die Natur des Schalles verschiedenartige Schwierigkeiten, und es scheint nicht zufällig, dass gerade dann, wenn versucht wird, der Einheit der Grundbegriffe "Ton", *Klang* und *sonus* in einer Definition beizukommen, die Vieldeutigkeit der verwendeten Termini besonders zum Tragen kommt. Das Definiendum *sonus* tritt bei Beeckman innerhalb des gleichen Satzes in zweierlei unverträglichen Bedeutungen auf. Diese Zweideutigkeit kann auf Beeckmans atomistische Deutung des Schalles bezogen werden.

Mit der Bewusstwerdung der Obertöne kommt es zu einer anderen Mehrdeutigkeit im gleichen Begriff *son/sonus*, die mit Beeckmans zweideutiger Begriffsanwendung inhaltlich nichts gemein hat, aber eine gleichartige logische Schwierigkeit zur Folge hat. Diese ergibt sich, wenn ein Objekt und die konstitutiven Elemente dieses Objekts mit dem gleichen Terminus referenziert werden:

Ein Ton (*sonus*) ist eine Menge von Tönen, die ...

Die im 19. Jahrhundert von Koch und Helmholtz im Deutschen getroffene Unterscheidung in Ton und Klang zur Beseitigung der zweiten Mehrdeutigkeit verschiebt das Problem nur um eine Hierarchiestufe aufwärts: Anstelle von Ton wird Klang in gleicher Weise doppelt referenziert:

Ein Klang (als Akkord) ist eine Menge von Klängen, die ...

Dafür ist ein Klang als konstitutives Element eine Kollektion von Tönen und im Spezialfall, wo diese Kollektion aus nur einem Ton besteht, auch ein Ton.

Wäre es also nur eine Frage der Terminologie, die Sprache wo notwendig um geeignete Begriffe zu ergänzen und den mehrdeutigen Gebrauch der bestehenden Begriffe durch Spezialisierung zu vermeiden, um dadurch die dahinterstehenden Phänomene zu klären, oder sind gar mit Dahlhaus die unscharfen Begriffe den unscharfen Phänomenen adäquat?

2.1.2. Beeckman: *sonus* und *ictus*

Non oportet existimare sonum quem percipiunt aures nostras, unum et individuum esse, quia pausa inter sonum et sonum non est perceptibilis: componitur enim sonus quem audimus ex tot sonis, quot sunt reditûs chordarum ad locum suum. Si verò duo soni fiant, auris non difficulter discernit quænam eorum crebrior fiat eodem tempore; quod non est alium quàm intelligere num pausæ inter sonum et sonum unius vocis sint majores pausis inter sonum et sonum voci alterius: sensus crebriore sono magis afficitur, quodque simplici sono non decrevisset, repetitis sonis facillimè dijudicat. [Beeckman 1604-1634/I, 53: 1614]

Man soll nicht meinen, dass der Ton, der von unseren Ohren empfunden wird einer und unteilbar ist, weil die Pause, die einen Ton von einem andern Ton trennt, nicht wahrnehmbar ist: Der Ton, den wir hören setzt sich aus ebenso vielen Tönen zusammen, wie es Rückläufe der Saite an ihren Platz gibt. Wenn aber zwei Töne bestehen, unterscheidet das Gehör mühelos, welcher von ihnen häufiger auftritt in derselben Zeit; was nichts anderes ist als wahrzunehmen, ob in der einen Stimme mehr Pausen zwischen je zwei Tönen auftreten als zwischen je zwei Tönen in der anderen Stimme: Der Sinn wird durch den sich häufiger wiederholenden Ton stärker angeregt, und was es im einfachen Ton nicht erkennt, unterscheidet es im repetierten Ton sehr einfach.

Der Terminus *sonus* wird von Beeckman in zwei verschiedenen Bedeutungen verwendet:

- die einzelne Auslenkung und Rückkehr, physikalische Elementarbaustein (*ictus*) aus dem Schall zusammengesetzt ist.
- die unteilbar erscheinende Perzeption eines periodischen Vorgangs, die mit einer Tonhöhenempfindung (als Mass für seine Frequenz) einhergeht.

Die Bedeutung von *pausa* ist für die Interpretation der Stellen zentral: Im Durchgang der Saite durch die Ruhelage ist die Geschwindigkeit der Saite maximal, und momentan zur Ruhe kommt sie im Zeitpunkt der Bewegungsumkehr. Es ist kaum anzunehmen, dass Beeckman glaubt, die Saitenbewegung geschähe ruckartig mit dazwischenliegenden bewegungsfreien Zeitintervallen, denn er erwähnt in einem vorangehenden Eintrag das Trägheitsgesetz [Beeckman 1604-1634/I, 24: Juli 1613-April 1614] auch für die Kreisbewegung. Eine Pause zwischen zwei Tönen macht erst unter Annahme einer atomistischen Deutung des Schalles Sinn. Die schwingende Saite löst mit jedem Durchgang durch die Nulllage eine Zerteilung der umgebenden Luft in wegfliegende Kügelchen aus. Die Produktion des Schalles besteht also in der Umwandlung einer kontinuierlichen Bewegung in ein zu diskreten Zeitpunkten ausgelöstem Aussenden der Kügelchen [Bild : Pfeilbogen]. Es wäre unter dieser Vorstellung denkbar, dass nur bei jedem zweiten Durchgang durch die Nulllage der Saite ein Höreindruck bewirkt wird; im andern werden die Teilchen in die andere Richtung geschleudert. Diese Vorstellung impliziert eine nicht kugelförmige Ausbreitungscharakteristik der Teilchen.

Das Wort *ictus* steht nur in der vermutlich erst 1628 hinzugefügten zusammenfassenden Randnotiz [vgl. Beeckman 1604-1634/I, Einleitung C. de Waard, XXVIII]:

Sonus in pluribus ictûs divisibilis.

Ictus ist mit der engeren Bedeutung von *sonus* als Tonimpuls synonym.

Die Vorstellung der geschlagenen und zerstückelten Luft aus der atomistischen Deutung des Schalls lässt sich in der definitorischen Bestimmung des Schalls im Französischen mit *battements/battement* und im deutschen mit *Schlagen* noch weit in die Zeit verfolgen, wo Schall als Welle ohne transportierte Materie begriffen wird, z.B. Rousseau [Kap. 3.3.1], Mattheson [1748, 40; Kap. 3.1.9], Erxleben [1777, 243].

Die Terminologie *oscillation/ondulation/vibration* vs. *battement* (Beeckman *sonus* = *ictus*-Folge) scheint sehr eng mit den Modellvorstellung der Schallübertragung zusammenzuhängen und lässt sich auf die diskrete und die kontinuierliche Weltsicht (Pythagoras versus Aristoteles/Euklid) beziehen. Bei Beeckman, der einen Materietransport annimmt, trifft ein Kugelregen das Gehör, die Saite aber bewegt sich kontinuierlich. Für Mersenne ist kein Materietransport notwendig, die Teile der elastischen Luft schwingen hin und her und reichen so ihre Energie an benachbarte Teile weiter. Mersenne selbst beschreibt das Phänomen der Schwebungen, ohne es zu benennen. Praetorius findet den Ausdruck *Schwebung* als „orgelmacherischer Ausdruck“ unpassend. Sauveur verwendet ab 1700 den Ausdruck *battement* für Schwebungen. Smith [1749] unterscheidet die Schwebungen in *undulations* (langsam) und *beats* (schnell). Young [1800] (*beating*) sieht schnelle Schwebungen als Ursache der Tartinischen Töne, deshalb wurden sie Englischen auch *grave harmonics* genannt. Setzt man nicht die Ohmsche Gleichung $Ton = Sinuston$ voraus, sondern die allgemeinere $Tonhöhe = Periodizität$, dann haben Schwebungen und Töne dieselbe

Ursache: langsame Schwebungen kann man bewusst zählen, schnelle Schwebungen gehören dem unbewussten Zählen der Seele und verursachen eine Tonempfindung [vgl. Kap. [4.2.1](#)]

2.1.3. Praetorius: Qualitative Erzeugung und quantitative Messbarkeit

Vergeblich sucht man bei Praetorius eine physikalische Wesensbestimmung des Tons. Obschon er den Nutzen und die Notwendigkeit von Begriffsbestimmungen einsieht (*Termini Musici*), werden die akustischen Grundbegriffe *Schall*, *Thon*, *Klang* stillschweigend vorausgesetzt. Ihre schwer gegen einander abgrenzbaren Bedeutungen lassen sich teilweise aus ihrem Anwendungskontext erschliessen [s.u.]. Die folgende Passage gleich zu Beginn von *De Organographia* 1619 gibt Aufschluss über die Einteilungskriterien von Praetorius.

Was aber die Abtheilung solcher Musikalischen Instrumenten belangt / so kan man dieselbe von einander füglich nicht unterscheiden / als nach ihrem Thon und klang.
 Erstlich *quo ad qualitativam generationem*, wie nemlich und mit was bewegung der Instrumente und Menschlichen Glieder derselbe Schall und Klang verursacht wird.
 Zum Andern / *quo ad quantitativam mensurationem*, wenn wir der Instrumenten Schall und Thon / nach dem er lange weret / oder hoch und niedrig kan gebracht werden / betrachten. [Praetorius 1619/II, 1]

Ursache von Schall ist Bewegung. Bewegung der menschlichen Glieder, Bewegung der Instrumente oder ihrer Bestandteile. Die Art dieser verursachenden Bewegungen dient als Einteilungskriterium für die Musikinstrumente. Diese Einteilung entzieht sich einer Quantifizierung. Demgegenüber sind Dauer und Tonhöhe objektiv bestimmbare physikalische Größen. Sie scheinen sogar als abstrakte Begriffe unabhängig von ihrer konkreten Realisierung in verschiedenen Instrumenten zu existieren.

Das Verhältnis zwischen der Art der Schallerzeugung und dem daraus resultierenden Höreindruck ist ein zentrales Thema in Praetorius *De Organographia*. Da er keine klare begriffliche Trennung zwischen qualitativen Unterschieden in der Schallquelle und denjenigen ihrer Rezeption zu machen scheint, entsteht der Eindruck, als ob zwischen den beiden Aspekten qualitative Erzeugung und quantitative Messbarkeit nichts weiteres existierte.

Des ungeachtet vergleicht Praetorius Orgeltöne von Zungenpfeifen mit ähnlich klingenden Instrumenten und anderer Schallerzeugung. Die Art der Bewegung legt also den Klangcharakter nicht umkehrbar eindeutig fest: Es gibt Instrumente von verschiedener Gestalt, die zum gleichen Schallergebnis führen. Dies wird ausgenützt, wenn Variationen in der Bauart von Orgelpfeifen allein zum Zwecke einer täuschenden Imitation anderer Instrumente vorgenommen werden. Ist es im pythagoreischen Sinn ein Defekt der Wahrnehmung, wenn sich die Menschen durch eine Orgelpfeife oder durch ein *Trumscheidt* täuschen lassen? Die Einteilung der Sinneswahrnehmungen korrespondiert jedenfalls nicht mit den Einteilungen der Bewegungen und Klangkörper.

Das Kommunikationsmodell bei Praetorius hat folgende Stationen:

Bewegung → Schall → Hörwahrnehmung

Die Bewegung, zum Beispiel das Streichen einer Saite oder das Schlagen einer Glocke, verursacht den Schall, der aus dem Musikinstrument herauskommt und in den Menschen hineingeht. Keine Fragen zur Natur der Schallausbreitung, zum Medium oder gar zum Wesen

der Wahrnehmung. Die Natur des Schalles als Luftbewegung ist kein Thema, der Objektcharakter der Klänge, definiert über die Zuordnung zum klingenden Körper unproblematisch.

Alle zur Zeit nicht quantitativ bestimmbaren (= messbaren) Eigenschaften entziehen sich einer physikalisch systematischen Betrachtung und sind nur qualitativ, d.h. einer (qualitativen) Empfindungssprache zugänglich. Diese Sprache selbst wird aber nicht thematisiert. Trotzdem klassifiziert Praetorius innerhalb des Qualitativen. Diese Klassifikation steht im Spannungsfeld von Klangerzeugung, Satztechnik und Psychologie und bedient sich eines reichen Vokabulars.

Was aber bedeutet für Praetorius *quantitative* Messbarkeit? Quantifizierbar ist allein die Tonhöhe und die Zeit, nicht aber die Lautstärke. Messen heisst vergleichen mit Referenzgrössen. Solche Referenzgrössen sind im Falle des Klingenden zeitlicher Natur. Und Zeitmessung ist im beginnenden 17. Jahrhundert nicht unproblematisch. Pendel- und Federuhr, die eine Messgenauigkeit im Sekundenbereich ermöglichen, werden erst in der zweiten Hälfte des 17. Jahrhunderts durch Christiaan Huygens erfunden; es bleibt der Puls und das musikalische Zeitgefühl. Der Vergleich von Tonhöhen ist zwar ziemlich genau möglich, bedingt aber das wahrnehmende musikalische Subjekt, das zwei Tonhöhen auf Gleichheit testet. Dieses Vergleichen findet in der gleichen Sinnesmodalität statt. Der Vorgang kann bei Saiten durch das Beobachten des Mitschwingens optisch unterstützt werden. Ausgehend davon können beispielsweise über Saitenteilung, das heisst Proportionenlehre und Längenvergleiche, die Töne des Tonsystems eingestimmt werden. Die Definition eines festen Referenztones (analog dem Urmeterstab der Längenmessung, Paris 1799) ist wegen der vielen tonhöhenbestimmenden Parameter, die in dieser Zeit erkannt werden, bei keiner Art der Schallerzeugung möglich. Es ist schwer zu entscheiden, ob Praetorius den Zusammenhang zwischen Frequenz und Tonhöhe bekannt war. Falls nein, ist die Messbarkeit der Tonhöhe gleichbedeutend mit den Längenmessungen am Monochord. Dass ihm die Problematik der zeitlichen Konstanz der Stimmung vertraut war, zeigen seine Überlegungen zur Dimension [vgl. Kap. 2.3.1].

Praetorius scheint anzunehmen, dass die von Tonhöhe und Zeit verschiedenen Eigenschaften der Töne sich grundsätzlich einer quantitativen Beschreibung entziehen. Retrospektivisch aus Sicht der modernen Psychoakustik erscheint dies als Fehlschluss aus dem aktuellen Wissensstand.

2.1.4. Descartes: Musiktheorie, Physik und Wahrnehmung

Descartes' Auseinandersetzung mit den Tönen lässt drei verschiedene Perspektiven erkennen. Die symbolisch musiktheoretische Auffassung im *Compendium musicae* [1619], die sich losgelöst von jeglichen physikalischen Grundlagen an der Proportionenlehre orientiert, die Sicht auf die Schallquelle und das Übertragungsmedium in seiner Korrespondenz mit Mersenne und Beeckman um 1630 und die wahrnehmungszentrierte Auffassung in *Les passions de l'âme* [1649].

COMPENDIUM MUSICÆ.
RENATI CARTESII.
Hujus *objectum* est *Sonus*
Finis ut delectet, variosque in nobis moveat
affectus, fieri autem possunt cantilenæ simul
tristes & delectabiles, nec mirum tam diversa. Ita

LEITFADEN DER MUSIK
Von Renatus Descartes
Er hat den Ton zum Gegenstand
Der Zweck des Tones ist es letzten Endes, zu
erfreuen und in uns verschiedene
Gemütsbewegungen hervorzurufen. Die Gesänge

enim eleiographi & tragœdi eo magis placent, quo majorem in nobis luctum excitant.

Media ad finem, vel Soni affectiones duæ sunt præcipuæ, nempe hujus differentie in ratione durationis vel temporis, & in ratione intensionis circa acutum aut grave, nam de ipsius soni qualitate, ex quo corpore & quo pacto gratior exeat, agunt Physici.

Id tantum videtur vocem humanam nobis gratissimam reddere, quia omnium maxime conformis est nostris spiritibus. Ita forte etiam amicissimi gratior est quam inimici ex sympathia & dipathia affectuum, eadem ratione qua ajunt ovis pellem tensam in tympano obmutescere si feriat, lupinâ in alio tympano resonante.
[Descartes 1619/1650, 5]

können aber zugleich auch traurig und ergötzlich sein. Und es ist nicht verwunderlich, daß sie so verschieden sind. Gefallen uns doch die Elegien- und Tragödiendichter um so mehr, je mehr Trauer sie in uns erregen.

An Mitteln zu diesem Zweck oder der Eigenschaften des Tones gibt es vornehmlich zwei: nämlich die Verschiedenheit hinsichtlich seiner Dauer oder Zeit und in seiner Stärke in bezug auf Höhe und Tiefe. Von der Beschaffenheit des Tones selbst, womit und wodurch er am geeignetsten erzeugt wird, handeln die Physiker.

Dies wiederzugeben, scheint uns gerade die menschliche Stimme am geeignetsten zu sein, weil sie unserm Geiste am entsprechendsten ist. Daher kommt es vielleicht von der Sympathie oder Antipathie der Empfindungen, daß uns die Stimme eines Freundes angenehmer als die eines Feindes ist, wie wenn man in dieser Beziehung sagte, daß eine mit einem Schafsfelle bespannte Pauke verstummt, wenn man sie schlägt, eine andere mit einem Wolfsfell bespannte tönt.

[Brockt 1978, 3]

Es besteht eine strikte Trennung zwischen Ästhetik und Physik.

Etwas freier könnte „in ratione intensionis circa acutum aut grave“ mit Tonhöhenverhältnisse wiedergegeben werden. Descartes lässt nur die durch die Notenschrift eindeutig fixierbaren Parameter als Träger von Affekten zu. Die Bestimmung dieser Elementargrößen ist keine absolute, sondern beruht auf Proportionen. Dies ergibt sich auch aus seinen Axiomen der Musiktheorie [vgl. Kap. 1.1.4]. Damit geht Descartes kaum über den Gegenstand herkömmlicher Traktate hinaus. Die qualitative Bestimmung des Tones ist Sache der Physiker. Im Unterschied zu Praetorius ist für Descartes eine vollständige physikalische Beschreibung des Schalles nicht ausgeschlossen. Sie liegt aber ausserhalb des Zweckes seines *Compendiums*.

Zur Diskussion der Tonhöhe als Frequenz und der Entdeckung dieses Zusammenhangs, findet sich in den *Cogitationes privatae* ein früher Hinweis:

Idem suspicatur nervos in testudine eò celerius moveri quò acutiores sunt, ita vt duos motus edat octava acutior, dum vnum gravior; item Quinta acutior $1\frac{1}{2}$, &c. [Descartes, *Cogitationes privatae* 1619, A.T. X, 224]

Derselbe glaubt, dass die Saiten einer Laute sich umso schneller bewegen je höher sie sind, derart dass die höhere Oktave zwei Bewegungen macht, während die tiefere eine; ebenso die höhere Quinte eineneinhalb usw.

Idem bezieht sich auf Isaacus Middelburgensis [a.a.O., 223] d.h. auf Beeckman.

Descartes' Kenntnis des Zusammenhangs zwischen Frequenz und Tonhöhe geht also auf Beeckman zurück. Da er nicht auf die Richtigkeit der Gleichsetzung eingeht, ist anzunehmen, dass es sich für ihn nicht um eine gesicherte Erkenntnis handelt. Das gleichzeitig entstandene *Compendium musicæ*, nimmt denn auch keinen Bezug darauf und stützt sich in der Lehre von den Konsonanzen voll auf die Saitenteilung am Monochord.

Von Mersenne zehn Jahre später über die Natur des Tons (*son*) befragt antwortet Descartes:

[...] les sons, qui sont certainement, comme vous dites vn battement qui ce fait par plusieurs tours & retours, sans que le son d'une bale de mousquet y face de difficulté. Car les retours sont seulement requis en l'air qui frappe l'oreille, & non point en ce qui engendre le son : Que si ilz se rencontrent aus cordes, vous voyés le vent qui sort de nostre bouche en sifflant, ou bien celui qui passe dans les flustes, aller tout droit & ne faire pas plus de retours qu'un boulet de canon. Mais ilz ne laissent pas de faire ondoyer l'air qui va frapper l'oreille, de mesme qu'une Pierre entrant dans l'eau ne laisse pas d'y faire plusieurs cercles qui se suivent les uns les autres, encore qu'elle decende toute droite. [Descartes, Brief an Mersenne, 18.12.1629, A.T. I, 103-104]

[...] gewiss sind die Töne, wie Sie sagen, ein Schlagen der Luft, das aus mehreren Hin- und Herbewegungen entsteht, ohne dass dabei der Ton einer Gewehrkugel eine Schwierigkeit macht. Denn diese Hin- und Herbewegungen sind allein in der Luft, die das Ohr trifft, erforderlich, und nicht in dem [Körper], der den Ton erzeugt : Wie bei den Stimmbändern sehen Sie den Wind, der beim Pfeifen aus unserem Mund kommt, oder der durch die Flöten hindurchgeht, sich völlig gerade bewegen und nicht mehr Rückwärtsbewegungen als eine Kanonenkugel machen. Aber sie lassen die Luft schwingen, die das Ohr schlagen wird, gleich wie der Stein der ins Wasser fällt, mehrere Kreise entstehen lässt, die aufeinander folgen, obschon er geradlinig sinkt.

Beeckmans Auffassung scheint nun also akzeptiert. Die Unterscheidung zwischen Schallquelle und Medium erlaubt es, aus einer geradlinigen Bewegung der Schallquelle eine periodische Bewegung der Luft „abzuleiten“. Descartes behauptet also eine Nichtlinearität bei der Bewegungsübertragung von der Schallquelle auf das Übertragungsmedium. Die Luft wird durch impulsartiges Anstossen in Eigenschwingungen versetzt. Mit der Vorstellung, dass das Bewegungsverhalten des klingenden Körpers nicht mit dem der Luft zu korrespondieren braucht, könnten auch die Obertöne erklärt werden, ein Ansatz, der von Mersenne in der *Harmonie universelle* vorgeschlagen wird [s.u.]. Es ist aber hervorzuheben, dass dies der von Mersenne angenommenen passiven Rolle der Luft bei der Schallübertragung widerspricht. Für Descartes bedeutet *son* im obigen Zitat Schall, während Mersennes Definition auf musikalische Töne mit erkennbarer Tonhöhe zutrifft. Der Mangel des Französischen an differenzierenden Substantiven ist mit einer Ursache für die Schwierigkeit, die akustischen Grundbegriffe zu definieren.

Die Analogie zu den Wasserwellen dürfte sich in diesem Punkt eher erkenntnisthemmend auswirken, da sie transversale und nicht longitudinale Schwingungen der Luft suggeriert.

Im nächsten Brief an Mersenne kommt die Mehrdeutigkeit im Begriff *son* klar zum Ausdruck. Es ist die gleiche wie Beeckman [s.o.]:

Car il faut remarquer que si le son ne frappe l'oreille qu'une seule fois, il est bien entendu comme bruit, mais non pas distingué comme son qui soit grave ou aigu; il faut pour cela qu'il frappe l'oreille au moins deux ou trois fois, afin que par l'intervalle qui est entre les deux battements, on estime combien il est grave ou aigu; [Descartes, Brief an Mersenne, Januar 1630, A.T. I, 107]

Denn es ist zu bemerken, dass der Ton der das Ohr nur einmal schlägt, als Geräusch und nicht als Ton, der hoch oder tief ist, gehört wird. Dazu ist erforderlich, dass er das Ohr mindestens zwei oder dreimal schlägt, damit man anhand des Intervalls zwischen den beiden Schlägen abschätzen kann, wie tief oder hoch er ist.

Über Beeckman hinausgehend wird die Wahrnehmung eines einzelnen *ictus* als Geräusch charakterisiert. Die Fouriertransformierte eines einzelnen Impulses zeigt in der Tat eine grosse Frequenzunsschärfe, und psychoakustische Untersuchungen zeigen, dass schon nach zwei Perioden ein Tonhöhereindruck möglich ist [vgl. Bilsen 1969/70, 63-73]. Descartes

scheint davon auszugehen, dass dieser durch Verrechnung der Periodenlängen entsteht. Dazu ist keine Fouriertransformation erforderlich. Tonhöhereindruck ist also „Zählen pro Zeit“ von sukzessiven gleichartigen Geräuschen. Durch Repetition wird aus einem breitbandigen ein schmalbandiges tonartiges Geräusch.

[...] quod *ictus* istos attinet, si quid paulo altius quàm primas litteras pueros tuos docuisses, inuenisses apud Aristotelem illud ipsum (nempe sonum oriri ex repetitis chordarum aliorumue corporum aëri allisorum ictibus) quod tuum appellas, quodque me tibi cum elogio non adscripsisse conquereris. [Descartes, Brief an Beeckman, 17.10.1630, A.T. I, 162]

Was diese *ictus* betrifft, hättest du, wenn du deine Knaben nur ein wenig mehr als die ersten Buchstaben gelehrt hättest, all das, was du dein nennst (nämlich dass der Ton aus den wiederholten *ictibus* der Saiten oder anderer in der Luft angeschlagener Körper entsteht) und was du beklagst, dass ich es dir nicht mit Lob zugeschrieben habe, bei Aristoteles finden können

In den elf Jahren seit der Verfassung der Notiz in den *Cogitationes privatae* zur Zeit seiner ersten Begegnung mit Beeckman hat Descartes seine Kenntnisse in antiker Wissenschaft erweitert. Und da er gewöhnlich die Leistungen der alten Denker eher geringerschätzt, wird die Kenntnis des Zusammenhangs zwischen Tonhöhe und Frequenz als Trivialität abgestempelt. Lieber das, als zuzugeben, etwas von einem Zeitgenossen gelernt zu haben. (Im Laufe des Streites mit Beeckman fordert Descartes auch eine Abschrift seines Compendiums von diesem zurück.)

Ein völlig andere wahrnehmungszentrierte Perspektive nimmt Descartes in seiner letzten Schrift, *Les passions de l'âme* [1649] ein:

Des perceptions que nous rapportons aux objets qui sont hors de nous.

Celles que nous rapportons à des choses qui sont hors de nous, à sçavoir aux objets de nos sens, sont causées (au moins lors que nostre opinion n'est point faus|se) par ces objets, qui, excitant quelques mouvemens dans les organes des sens exterieures, en excitent aussi par l'entremise des nerfs dans le cerveau, lesquels font que l'âme les sent. Ainsi lors que nous voyons la lumiere d'un flambeau, & que nous oyons le son d'une cloche, ce son & cette lumiere sont deux diverses actions, qui par cela seul qu'elles excitent deux divers mouvemens en quelques uns de nos nerfs, & par leur moyen dans le cerveau, donnent à l'âme deux sentimens differens, lesquels nous raportons tellement aux sujets que nous supposons estre leurs causes, que nous pensons voir le flambeau mesme, & ouïr la cloche, non pas sentir seulement des mouvemens qui viennent d'eux. [Descartes 1649, *Des passions en general*, Article XXIII, 40]

Über die Wahrnehmungen, die wir auf die Gegenstände außer uns beziehen.

Diejenigen, die wir auf die Dinge außer uns beziehen, das heißt auf Sinnesgegenstände, sind (wenigstens wenn unsere Annahme sich nicht als falsch erweist) durch diese Gegenstände bewirkt, die eine Bewegung in den äußeren Sinnesorganen hervorrufen, – dann mittels der Nerven auch im Hirn bewirken, daß die Seele sie empfindet. Wenn wir das Licht einer Fackel sehen oder den Ton einer Glocke hören, sind dieser Ton und dieses Licht zwei verschiedene Vorgänge, die dadurch, daß sie zwei verschiedene Bewegungen in bestimmten Nerven und mittels dieser im Hirn hervorrufen, der Seele zwei verschiedene Empfindungen geben, die wir derart auf Gegenstände als ihre Ursache beziehen, daß wir denken, wir sähen die Fackel selbst und hörten die Glocke selbst, während wir nur Bewegungen empfinden, die von ihnen ausgehen. [Hammacher 1984, 41]

Ton- und Lichtempfindung ist Bewegung, die sich von den äusseren Sinnesorganen aufs Gehirn überträgt. Die Ursache der Reizung der Sinnesorgane ist in der Regel eine Bewegung, die vorgängig an einem anderen Ort stattfindet und sich auf dem Luftweg überträgt. Wird die zum Ton einer entfernten Glocke gehörige Bewegung stattdessen durch Direkteinwirkung auf das Trommelfell simuliert, entsteht genauso der Höreindruck eines Glockentons – die gleiche

Täuschung wie die mittels Kopfhörer [vgl. Johannes Müller/Helmholtz; Warren, Warren 1968, 84-85: Gesetz der spezifischen Sinnesenergien]. Es ist für Descartes letztlich irrelevant ob die äussere Schallübertragung als Welle oder mittels Materietransport geschieht. Wie aber stellt er sich die Bewegungsübertragung zwischen Sinnesorgan und Gehirn vor? An anderer Stelle [Artikel XII] scheint er, indem er die Nervenleitung mit dem Ziehen an einem Seil vergleicht, von einer instantanen Übertragung auszugehen [Descartes 1649, Vorwort Hammacher (1984), XXXVII], was auf eine analoge transformationsfreie Übertragung zwischen Sinnesorgan und Gehirn hinausläuft. Dadurch wird die Interpretation der Umweltreize vollumfänglich an das Gehirn delegiert: Der Mann im Mann [vgl. *Dioptrique*, 1637].

2.1.5. Mersenne: schlagende und geschlagene Luft

Le son n'est autre chose qu'un battement d'air, que l'ouïe apprehende lors qu'elle en est touchée. Or les deux principales propriétés du son consistent dans la force & dans les qualités que nous appelons *grave et aigu*.

Sa force est d'autant plus grande qu'il est fait par un battement d'air plus violent [...].

Quant à sa gravité, elle est d'autant plus grande, qu'il se fait par des battements plus tardifs; & par conséquent il est d'autant plus aigu qu'il se fait par des battements plus vistes [...]. [Mersenne 1636, *Abregé de la Musique speculative*, Article I]

Der Ton ist nichts anderes als ein Schlagen der Luft, welches das Gehör vernimmt, wenn es davon berührt wird. Die zwei hauptsächlichsten Eigenschaften des Tons bestehen in seiner Stärke und in den Qualitäten, welche wir tief und hoch nennen. Seine Stärke ist umso grösser, wenn er durch ein heftigeres Schlagen der Luft gemacht wird [...]

Bezüglich seiner Tiefe ist diese umso grösser, als er durch langsamere Bewegungen verursacht wird und folglich umso höher, als er durch schnellere Bewegungen verursacht wird

Der Ton ist ein *Schlagen* der Luft, das die Menschen vernehmen können, wenn ihre Ohren im Wirkungsfeld dieses Schlagens sind. Der Ton hat zwei primäre Eigenschaften, seine Stärke und das Qualitätenpaar *tief/hoch* (*schwer/spitz*). Beide Eigenschaften sind auf Merkmale der Luftbewegung zurückführbar. Von der Schallquelle ist konsequenterweise nicht die Rede. Der Begriff des *Schlagens* begegnete uns schon bei Beeckman (*ictus*) unter der Korpuskelauffassung der Schallausbreitung. Weshalb verwendet Mersenne statt *battement* nicht *vibration* oder *ondulation*? Aufschlussreich in diesem Zusammenhang ist Leonardo da Vincis Deutung des Summtons der Fliege als verursacht durch ihren Flügelschlag, der tiefer und heiser wird, wenn man ihr – im Tierversuch – etwas Honig in die Flügel streicht:

That the sound which flies make proceeds from their wings you will see by cutting them a little, or better still smearing them a little with honey in such a way as not entirely to prevent them from flying, and you will see that the sound made by the movement of the wings will become hoarse and the note will change from high to deep to just the same degree as it has lost the free use of its wings.

[Dell'Anatomia Fogli A, Royal Library, Windsor zitiert nach: Leonardo and the aerodynamic sound produced by a fly, <www.tele.ntnu.no/akustikk/person/kristiansen/leonardo01.html> (Juli 03)].

Das Französische gebraucht für Flügelschlag sowohl *coup d'aile* als auch *vibration d'aile*, das Italienische *colpo d'ala* und das Englische *flapping of wings* und *beating of wings*. Es ist demnach anzunehmen, dass im Original *movimento* für das englische *movement* steht. Dem Zitat voraus geht eine Überlegung Leonardos, wonach der Ton der Fliege aus

Dimensionsgründen nicht aus einer Lunge stammen könne. Der Zusammenhang Frequenz – Tonhöhe ist somit schon Leonardo bekannt.

I De la nature et des proprietéz dv son

[...] si le Son, qui est le suiet, ou l'obiet de la Musique & de l'ouye, a vn estre reel, & quel il est: car il s'en trouue plusieurs que croyent que le Son n'est rien, s'il n'est entendu, & que c'est vne simple impression de l'air qui ne doit point estre appellé Son, s'il n'y a quelque oreille qui l'entende [...].

Quant à mon particulier, i'estime que le Son n'est pas moins reel deuant qu'il soit entendu, que la lumiere, ou les couleurs, & les obiets des autres sens extérieurs auant qu'ils soient aperceus [...].

Neantmoins ie n'estime pas que le Son soit different du mouuement du corps, qui frappe le Tambour, ou la Membrane de l'oreille: car il n'est pas necessaire d'ajouter vne qualité de la troisieme espece, que l'on appelle ordinairement *qualité patible*, d'autant que le mouuement de l'air suffit pour expliquer tout ce que se fait par les Sons. [Mersenne 1636/I, 1]

I Von der Natur und den Eigenschaften des Tons

[...] ob der Ton, der Subjekt oder Objekt der Musik und des Hörens ist, ein wirkliches Dasein hat, und welches dies ist: Weil es viele gibt, die glauben, dass der Ton nichts ist, wenn er nicht gehört wird, und dass es eine einfache Impression der Luft ist, welche kaum Ton genannt werden kann, wenn es kein Ohr gibt, dass ihn hört. [...]

Was mich betrifft, meine ich, dass der Ton nicht weniger wirklich ist, bevor er gehört wird, wie das Licht oder die Farben und die Objekte der anderen äussern Sinne, bevor sie bemerkt werden.

Ebenso wenig glaube ich, dass der Ton verschieden sei von der Bewegung des Körpers, die das Trommelfell schlägt: denn es ist nicht nötig, eine Qualität der dritten Art hinzuzufügen, welche man gewöhnlich *qualité patible* nennt, weil die Bewegung der Luft ausreicht, um alles zu erklären, was die Töne bewirken.

Die Frage nach der Existenz von Gegenständen jenseits des wahrnehmenden Subjekts ist ein zentraler Streitpunkt in der Philosophie des Empirismus und Sensualismus. Sie ist im Falle der transitorischen Schallvorgänge besonders delikat. Töne sind für Mersenne „nicht weniger wirklich“ als die Wahrnehmungsgegenstände der anderen Sinne. Durch diesen Vergleich wird die erkenntnistheoretische Frage elegant umschifft.

Qualität der dritten Art, *qualité patible*, bezieht sich auf Aristoteles *Die Kategorien* [Achstes Kapitel, 37-48 = DigBib 2809-2820] :

- Erste Art: Eigenschaften und Zustände : Zustände sind transitorisch, Eigenschaften persistent.
- Zweite Art: Vermögen oder Unvermögen, natürliche Prädispositionen
- Dritte Art: leidende Beschaffenheiten und leidende Zustände.

Der Art sind z.B. die Süßigkeit, die Bitterkeit, die Säure und alles dem Verwandte auch die Wärme und die Kälte und die Weisse und die Schwärze. Dass sie Beschaffenheiten sind, ist klar; denn das was sie angenommen hat, wird nach ihnen beschaffen genannt; [...]

sie heissen deshalb leidende Beschaffenheiten, weil jede der genannten Beschaffenheiten in Bezug auf die Sinne ein Leiden bewirkt. So bewirkt die Süßigkeit ein gewisse Leiden für den Geschmackssinn und die Wärme für den Gefühlssinn und ähnlich die andern Beschaffenheiten. [...]

Alles dagegen, was sich leicht wieder auflöst und schnell beseitigt werden kann, heisst ein Zustand und nicht eine Beschaffenheit; denn man wird nicht danach beschaffen genannt. Weder der welcher aus Scham erröthet, wird roth gennant, noch der, welcher, aus Furcht erblasst, blass, sondern man sagt eher, dass sie etwas erlitten haben, deshalb heissen diese Fälle leidende Zustände und nicht leidende Beschaffenheiten.

In Übereinstimmung hiermit spricht man auch von leidenden Beschaffenheiten und Zuständen bei der Seele. [...] [Aristoteles, Organon, 39-42, zitiert nach: DigBib 2811-2814]

- Vierte Art: Figuren und Gestalten der einzelnen Dinge

Car si tost que ce mouuement a frappé la membrane de l'o- | reille, qui enferme l'air interieur, & les esprits qui seruent à l'ouye, le mouuement de l'air exterior se communique aux esprits interieurs, soit par le moyen du petit os qui est pendu au nerf de l'ouye, qui frappe sur vn autre petit os comme sur vne enclume [...].

Il faut donc conclure que tous les mouuement qui se font dans l'air, dans l'eau, ou ailleurs, peuuent estre appelez Sons; d'autant qu'il ne leur manque qu'une oreille assez delicate & subtile pour les ouyr
[...] le Son se peut definir *vn mouuement de l'air exterior ou interieur capable d'estre ouy*; i'ay dit, *ou de l'interieur*, à raison des bruits qui se font au dedans de l'oreille. [Mersenne 1636/I, 1-2]

Weil sich sobald diese Bewegung das Trommelfell trifft, das die die innere Luft und den Gehörsinn umschliesst, die Bewegung der äusseren Luft den inneren Organen [Geistern] mitteilt, sei es mittels des kleinen Knochens, der am Gehörnerven anhängt, der auf einen andern kleinen Knochen wie auf einen Amboss schlägt [...]

Man muss also schliessen, dass alle Bewegungen, die in der Luft, im Wasser oder anderswo stattfinden, Schälle genannt werden können; auch wenn ihnen ein genügend feines Ohr fehlt, um sie zu hören.

[...] der Schall lässt sich definieren als *eine Bewegung der äusseren oder inneren Luft, die gehört werden kann*, ich habe gesagt *oder der inneren*, weil es auch Geräusche gibt, die im Ohr selbst entstehen

Bei der Übertragung ins Deutsche von *Son/Sons* wäre wegen des Plurals auch *Ton/Töne* zu erwägen. Allerdings trifft die Gleichsetzung von *Son* mit *mouuement* viel eher für Schall zu. Mersenne geht bis zum Hörnerven von einer mechanischen Bewegungsübertragung aus. Auch innere Bewegungen können gehört werden. Es wird noch lange Zeit angenommen, das Innenohr sei mit Luft und nicht mit Flüssigkeit gefüllt [z.B. Rivinus, Winslow gemäss de Mairan 1737, 50]. Dadurch werden äusserliches und innerliches Hören auf eine gemeinsame Grundlage gestellt und die beiden Formen des Hörens sind dadurch gleichberechtigt. Dennoch wird die Schallübertragung durch flüssige Medien ausdrücklich erwähnt. Luft ist für Mersenne ohnehin bloss Wasser mit einer geringeren Dichte.

2.1.6. Poisson : Kornfeldmetapher

Poissons Tonbegriff deckt sich mit der Auffassung von Beeckman. Der Ton ist eine Abfolge von Impulsen. Um zu erklären, wie daraus eine einheitliche Empfindung werden kann, greift er zur Metapher:

[...] contre le tympan de l'oreille se trouve l'extrémité du nerf acoustique, constitué d'un grand nombre de capillaires, dont j'oserais presque dire qu'ils sont comme un champ de blé uniformement agité par les vents. Car, lorsqu'il est agité par les très nombreuses bourrasques de vent, restant por ainsi dire, incliné, il n'a pas le temps de se redresser et l'on croit, à tort, que ces coups succesifs sont une action uniforme des vents.

De même ces capillaires dont l'extrémité parvient à l'oreille reçoivent fréquemment le choc du tremblement de l'air de sorte qu'ils restent toujours infléchis et courbée, et l'âme s'aperçoit de la même position sans percevoir la répétition du même son. [Poisson 1668, 105-106]

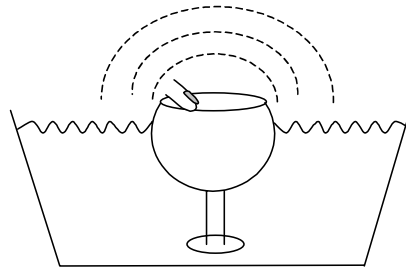
[...] am Trommelfell des Ohrs befindet sich das Ende des akustischen Nerven, der aus einer grossen Zahl von Kapillaren besteht, von denen ich fast zu sagen wage, dass sie wie ein Kornfeld sind, das durch die Winde bewegt wird. Denn dadurch, dass es durch die sehr zahlreichen Windstösse getroffen wird und sozusagen geneigt bleibt, hat es nicht die Zeit, sich wieder aufzurichten und man glaubt zu Unrecht, dass diese aufeinanderfolgenden Schläge eine gleichmässige Aktion der Winde sind.

Diese Kapillaren, deren Ende ans Ohr kommt, empfangen häufig den Schock des Zitterns der Luft derart, dass sie ständig gebogen und gekrümmt bleiben, und die Seele nimmt sie in der gleichen Position wahr, ohne die Wiederholung des gleichen Tones zum bemerken.

„répétition du même son“ : Die Einzelschwingung ist also der Ton und nicht erst die Wiederholung. Genau wie Beeckman verwendet Poisson den Begriff *son* inkonsistent.

Die Kornfeldsmetapher gibt keine Erklärung für die Wahrnehmung der Tonhöhe, sie ist aber ein treffende Veranschaulichung der Trägheit, die über Descartes hinausweist. Zusammen mit Rezeptoren zu vorgegebenen Eigenfrequenzen, läge eine Ortstheorie auf der Hand. Du Verneys Postulat einer ortsabhängigen Frequenzverarbeitung wird denn auch bereits 16 Jahre später 1683 veröffentlicht [vgl. Kap. [2.5.5](#)].

Anders als Beeckman versteht Poisson die Schallausbreitung als Welle und untermauert dies durch einen Versuch, mit dem die Schallwellen „sichtbar“ gemacht werden können: Man streicht mit einem befeuchteten Finger über den Rand eines leeren Glases, das in einem Gefäß mit Wasser steht. Dabei entsteht ein Ton und auf der Wasseroberfläche entstehen sich radial ausbreitende Wellen. Die Schallwellen sind also nach Poissons Auffassung gleichzeitig sichtbar und hörbar. Poisson vergleicht das Glas mit einer Glocke und das Wasser um das Glas herum mit der die Glocke umgebenden Luft. [Poisson 1668, 100-101]



Das Experiment zur Sichtbarmachung von Schallwellen wird von Galileo Galilei im *Dialogo* (1. Tag, 1638) beschrieben. Nach den dortigen Angaben bewirkt ein Umschlagen der Tonhöhe in die Oktave eine Zerteilung der Wasserwellen in zwei, das heisst eine Halbierung der Wellenlänge [vgl. Lindsay 1996, 630].

Die Schallgeschwindigkeit im Wasser beträgt 1400 m/s, eine Schallwelle der Frequenz 14 000 Hz hat damit im Wasser eine Wellenlänge von 10 cm, und bei 400 Hz ist die

Wellenlänge 3.5 m ($c = \lambda \cdot \nu$). Die zu beobachtenden Wasserwellen sind nur etwa 1 cm lang und breiten sich viel langsamer aus. Trägheitsbedingt können Frequenzen im Hörbereich optisch nicht registriert werden. Die gesehene Welle und der gehörte Ton haben also nicht die gleiche Frequenz. Ferner sind die Oberflächenwellen transversal und nicht longitudinal. Der Versuch zeigt nur, dass es Körper gibt, die gleichzeitig klingen und erzittern, und dass ein elastischer schwingender Körper Wasserwellen auslösen kann. De Mairan [1737, 45-48] nennt Gassendi (1592-1655) einen der ersten, der Wasserwellen mit Schallwellen verglichen habe.

2.2. Welle oder Teilchen? – Ausbreitung von Schall und Licht

In der antiken, atomistischen Deutung besteht die Welt aus unteilbaren, festen und unveränderlichen Partikeln sowie aus Leerraum dazwischen. Die physikalischen Eigenschaften der Körper, von Flüssigkeiten, Luft und Feuer wie Dichte, Oberflächenbeschaffenheit, Körperfarben ergeben sich aus der unterschiedlichen Anordnung und Gestalt dieser Teilchen [Helferich 1985, 8, 9, 43].

Ein passiver Wahrnehmungsbegriff für Hör- und Sehsinn nimmt eine unidirektionale Informationsübertragung an. Geht man dabei von einem Transport von Materie aus, können Schall und Licht unter einem einheitlichen Gesichtspunkt interpretiert werden: In beiden Fällen verlassen kleine Kügelchen den leuchtenden oder klingenden Körper, durchqueren den Raum zwischen Rezipiendum und Rezipienten und werden vom wahrnehmenden Subjekt registriert. Mersenne steht an der Grenze zwischen einer Korpuskel- und einer Wellenauffassung.

[...] Democrite, Epicure & quelques autres de leur secte ont estimé que le Son qui se fait par la rencontre, ou le battement de toutes sortes de corps n'est autre chose, qu'un mouvement, ou vne saillie de petits corps composez d'atomes, qui sortent des corps qui font le Son, comme les rayons sortent du Soleil, ou qui sont dans l'air, et qui estant frappez par le mouvement des corps, s'estendent de tous costez par les pores, ou les petits vuides du dit air, iusques à ce qu'ils ne rencontrent plus de vuide, & qu'ils soient arrestez par les petits corpuscules, ou atomes qui composent la substances de l'air; [Mersenne 1636/I, 6]

[...] Demokrit, Epikur und einige andere ihrer Sekte haben angenommen, dass der Ton der sich durch das Zusammentreffen oder Schlagen aller Arten von Körpern bildet, nichts anderes ist als eine Bewegung oder ein Herausspringen von kleinen Körpern, die aus Atomen zusammengesetzt sind, welche die Körper verlassen, die die Töne bilden, so wie die Strahlen, die Sonne verlassen, oder die sich in der Luft befinden und die, indem sie durch die Bewegung der Körper geschlagen werden, sich in alle Richtungen durch die Poren oder kleine Leerstellen der besagten Luft ausbreiten, bis sie keine Leerstelle mehr antreffen und von den kleinen Korpuskeln oder Atomen, welche die Luft bilden, angehalten werden; [...].

Bezüglich Zusammensetzung der Welt entscheidet sich Mersenne nie klar für oder gegen eine atomistische Deutung. Für die Ausbreitung des Lichtes scheint er an dieser Stelle die Teilchenauffassung nicht anzuzweifeln. In seinem umfangreichen Vergleich von Schall und Licht [Mersenne 1636/I, 44-48] schliesst er aber nicht aus, das auch Licht eine blosser Bewegung der Luft sein könnte [Mersenne 1636/I, 45]. Isaac Newton vertritt noch 1685 eine Teilchenauffassung und Christaan Huygens formuliert die erste Wellentheorie für Licht 1690. Die Schallausbreitung hingegen ist Mersennes Auffassung zufolge ohne Materietransport von der Schallquelle zum Empfänger möglich [Mersenne 1636/I, 9-10]. Die folgende Textstelle beschliesst Mersennes Besprechung der Atomtheorie und bringt sein Verständnis von der abbildenden Natur der Schallübertragung – wenn von der Frage des Materietransports abstrahiert wird – auf den Punkt.

[...] vne grande multitude de petits corps inuisibles, ou d'atomes qui volent dans l'air après qu'il a esté battu, & qui vont affecter toutes les oreilles qui se rencontrent dans leur chemin, afin de leur porter la nouvelle de ce qui s'est passé dans l'air, ou dans les corps dont ils sont parties, & dont ils sont les ambassadeur, ou les images & les representations. [Mersenne 1636/I, 6]

[...] eine Vielzahl kleiner unsichtbarer Körper oder Atome, die in der Luft fliegen und die auf alle Ohren treffen, die sich in ihrem Weg befinden, um ihnen die Neuigkeit zu überbringen, von dem was in der Luft oder in den Körpern, von denen sie stammen, geschehen ist, und von denen sie die Botschafter oder die Abbilder und Repräsentationen sind.

Mersenne bemerkt kurz davor, dass die Ausbreitung von Licht instantan erfolge, mindestens im Vergleich zu Schall in einer nicht messbaren Zeit [Mersenne 1636/I, 5].

Bei sofortiger Lichtausbreitung ergäbe sich ein verbindliches Kriterium für eine interindividuelle, ortsunabhängige Zeit. Bei je endlicher Ausbreitungsgeschwindigkeit ist dagegen die Analogie zwischen Schall und Licht einfacher konstruierbar. Es gibt dann

allerdings kein einfaches Kriterium zur Feststellung der Gleichzeitigkeit für verschiedene Orte. Bei vergleichbaren Geschwindigkeiten wäre ein solcher Zeitvergleich prekär. Nach de Mairan [1737, 36] ist die Lichtgeschwindigkeit mindestens 800 000 Mal grösser als die Schallgeschwindigkeit. Daraus ergibt sich bei 20 °C und dem modernen Wert 0.344 km/s für die Schallgeschwindigkeit mehr als 275 000 km/s.

Vergleichend dazu eine Stelle aus Francis Bacons *Organon*, 1620:

Diese Bewegung offenbart sich in dreifacher Art: durch die Strahlen des Lichts, durch Erschütterung der Töne und durch magnetische Mittheilung. So verschwinden mit Entfernung des Lichts sofort die Farben und sonstigen Bilder desselben. Wird die erste Erschütterung und das daraus folgende Zittern des Körpers beseitigt, so erlöscht sehr bald der Ton; denn wenn auch der Ton in dem Medium durch den Wind gleich Wellen getrieben wird, so ist doch festzuhalten, dass der Ton nicht so lange dauert als das Fortklingen. Allerdings scheint bei einer angeschlagenen Glocke der Ton lange Zeit fortzugehn, und man kann deshalb leicht irrthümlich meinen, dass der Ton während dieser ganzen Zeit gleichsam in der Luft schwimmt und hängt; allein dies ist durchaus falsch. Denn dieses Forttönen ist nicht derselbe erste Ton, | sondern ein neuer, wie aus der Hemmung oder Beruhigung des geschlagenen Körpers erhellt. Setzt man die Glocke auf oder hält sie fest, dass sie nicht erzittern, kann, so erlischt der Ton sofort, und sie tönt nicht nach; ebenso die Saiten, wenn man sie nach dem ersten Anschlag mit dem Finger berührt; überall hört bei der Leier oder der Rohrpfife oder bei dem Klavier das Nachklingen sofort auf. Wird der Magnet, entfernt, so fällt das Eisen sofort ab; dagegen kann der Mond nicht von dem Meere und die Erde nicht von dem fallenden schweren Gegenstande entfernt werden; man kann deshalb hier zwar keinen Versuch anstellen; allein das Verhältniss ist dasselbe. [Bacon: Große Erneuerung der Wissenschaften, S. 414-415. Digitale Bibliothek Band 2: Philosophie, S. 12822-12823 (vgl. Bacon-Organon, S. 352-353)]

„Erschütterung der Töne“ : Ton ist kommunizierte Bewegung.

„der Ton in dem Medium durch den Wind gleich Wellen getrieben wird“ : Wellenlehre.

„der Ton nicht so lange dauert als das Fortklingen“ : Schallausbreitung braucht Zeit.

Es ist unrichtig, „dass der Ton während dieser ganzen Zeit gleichsam in der Luft schwimmt und hängt“ : Töne sind keine physisch greifbaren Objekte.

„dieses Forttönen ist nicht derselbe erste Ton, | sondern ein neuer“ : Forttönen = Aufeinanderfolge von Impulsen (*ictus*) wie bei Beeckman.

Bacons Auffassung widerspricht also Descartes' Interpretation des Kanonendonners in Analogie zur Dauerhaftigkeit einer Wasserwelle als Folge der einmaligen Störung durch einen fallenden Stein [vgl. Kap. 2.1.4].

2.2.1. Schallausbreitung im Vakuum

Die von Mersenne aufgeworfene Frage nach der Möglichkeit der Schallausbreitung im Vakuum ist für die Natur der Informationsübertragung von zentraler Bedeutung. Ein genügend gutes Vakuum, das diese Frage entscheiden könnte, ist zu seiner Zeit technisch noch nicht zu realisieren. Mersenne koppelt die Möglichkeit der Schallausbreitung an die Möglichkeit von Bewegung im Vakuum, die zur Zeit noch ungeklärt sei und schreibt:

[...] ie dis si quelque quantité d'air se meut de la mesme sorte dans le vuide, que lors qu'elle est iointe avec les autres parties de l'air, qu'elle fera du Son, encore qu'il ne puisse estre porté à nulle oreille [...] [Mersenne 1636/I, 8]

[...] ich sage, dass wenn sich eine Luftmenge im leeren Raum in der gleichen Weise bewegen würde, wie wenn sie mit den andern Teilen der Luft verbunden wäre, sie einen Ton erzeugte, auch wenn er von keinem Ohr gehört werden könnte [...]

Oberflächlich besehen gibt es keine vernünftige Erklärung, wieso Schallausbreitung im Vakuum nicht möglich sein soll, wenn Schall aus fliegenden Kügelchen besteht. Mersenne scheint an dieser Stelle von einem Materietransport von der Schallquelle zum Empfänger auszugehen und weicht damit von der andernorts geäusserten Vorstellung der Luft als elastischem Medium ab. Obige Behauptung ist wegen ihres hypothetischen Charakters kaum zu widerlegen, und die Vorstellung von Luft im luftleeren Raum mutet paradox an. Wenn sich die von Vakuum umgebene Luft „in der gleichen Weise“ bewegte, müsste der Schall sich entweder kugelförmig ausbreiten und damit das Vakuum allmählich aufzehren, oder er würde am Rande zum Vakuum verschluckt oder reflektiert. Die erste Möglichkeit bewirkt eine Verdünnung der „Atmosphäre“ um den schwingenden Körper als Folge der weggeschleuderten Teilchen und ergibt sich aus der Teilchenhypothese. Die zweite Möglichkeit schliesst die Schallausbreitung durchs Vakuum aus und ist unter der Teilchen- und unter der Wellenperspektive denkbar.

Die Schallausbreitung in Flüssigkeiten und festen Körpern ist zur Zeit noch weitgehend ungeklärt.

Die Möglichkeit von Bewegung im Vakuum ohne umgebende Luft – eine schwingende Saite, eine Glocke – wird nicht erwogen. Descartes hat demgegenüber einen anderen Raumbegriff [vgl. Descartes, *Regulæ ad directionem ingenii*, Regula XIV, 1966, 8-13] und hat keine Mühe sich Bewegung im Vakuum vorzustellen [Descartes, Brief an Mersenne, 13.11.1629, A.T. I, 72-73].

Mit dem entsprechenden Experiment – schwingende „Schallquelle“ unter ausgepumpter Glashaube – wird später nachgewiesen, dass Schall im Unterschied zu Licht eines materiellen Ausbreitungsmediums bedarf. Die Lichtausbreitung im Vakuum, das heisst ohne Trägermedium, ist unter der Teilchenhypothese leichter vorstellbar als unter der Wellenhypothese.

2.2.2. Schallteilchen und Atome

Nach Auffassung von Beeckman und zeitweise wohl auch Descartes' [vgl. Kap. [2.3.3](#)] sind die Schallkügelchen verschieden gross und können in kleinere Schallteilchen zerfallen. Es ist also naheliegend, sie als Atomverbände oder Moleküle zu deuten. Die Grösse der Moleküle korrespondiert mit der Tonhöhe [vgl. Kap. [2.4.2](#)]. Ihre innere Struktur und ihre gegenseitige räumliche Konstellation könnten zur Erklärung der übrigen Klangqualitäten beigezogen werden.

Die Beobachtung, dass Schall durch eine schlagende Bewegung des klingenden Körpers verursacht wird, impliziert noch keine Theorie der Schallübertragung als Welle und auch keine Theorie seiner Rezeption.

2.2.3. Konstanz der Schallgeschwindigkeit

Die zur Zeit Mersennes festgestellte Konstanz der Schallgeschwindigkeit (bei ähnlichen Bedingungen) ist mit der Partikeltheorie nicht einfach zu erklären. Wenn die Grösse der Partikel beziehungsweise ihre Masse mit der Tonhöhe korrespondiert, scheint eine tonhöhenabhängige Ausbreitungsgeschwindigkeit auf der Hand zu liegen. Descartes vertritt in einem Brief an Mersenne noch 1630 diese Auffassung einer frequenzabhängigen Ausbreitungsgeschwindigkeit:

Ce que vous dites que le son aigu s'étend plus vistes que le graue, est vray en tout sens; car il est plus vistes porté par l'air, à cause que son mouuement est plus prompt; & il est plus vistes discerné par l'oreille, pour que ses retours se font aussi plus viste. [Descartes, Brief an Mersenne, Januar 1630, A.T. I, 107]

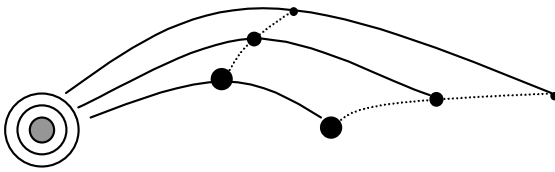
Was sie sagen, dass der hohe Ton sich schneller ausbreitet als der tiefe, ist in jedem Sinne wahr; denn er wird von der Luft schneller getragen, da seine Bewegung rascher ist, und er wird vom Ohr schneller erkannt, weil seine Schwingungen schneller erfolgen.

Das damit verwandte Gesetz des freien Falles, wonach die Fallgeschwindigkeit von der Masse unabhängig ist (an einem festen Ort und unter Vernachlässigung des Luftwiderstandes), wird von Galileo Galilei 1590 gefunden (und findet sich in den *Discorsi e dimostationi mathematiche*, Arcetri, 6. März 1638). Es widerspricht der vorwissenschaftlichen Intuition ebenso wie die konstante Ausbreitungsgeschwindigkeit von Schall. De Mairan versucht hundert Jahre später eine minime Frequenzabhängigkeit in Analogie zu derjenigen des Lichts experimentell nachzuweisen [De Mairan 1737]. Die am Ende des Zitats behauptete schnellere Erfassung der Tonhöhe hochfrequenter Töne erklärt sich wohl durch ein verborgenes Zählen der Perioden und nicht durch eine schnellere Nervenleitung: Verlangt man für die Tonhöhenbestimmung eine bestimmte, vorgegebene Zahl von Perioden zur Feststellung ihrer Periodizität, so steht die Tonhöhe von c'' im Vergleich zu derjenigen von c schon in einem Viertel der Zeit fest. Neuere Untersuchungen zeigen wie bereits erwähnt, dass unter Umständen schon zwei Perioden für einen allerdings unscharfen Tonhöhereindruck ausreichen [Bilsen 1969/70].

Eine tonhöhenabhängige Schallausbreitung hätte für Schall als Kommunikationsmittel verheerende Konsequenzen. In einer einstimmigen Melodie könnte dadurch bei genügender Entfernung die Reihenfolge der Töne durcheinander geraten. Ist man genügend weit weg, kämen sie nach Tonhöhen geordnet an. Sukzessive Töne könnten simultan beim Empfänger ankommen und ein rhythmisch genaues Zusammenspiel würde sinnlos, da jeder Zuhörer in Abhängigkeit von seiner Position mit einem anderen zeitlichen Ablauf konfrontiert wäre. Dies schon, ohne raumakustische Überlegungen in Erwägung zu ziehen.

Mersenne bemerkt, dass sich Aristoteles möglicherweise der zusammengesetzten Natur der Töne bewusst war, wenn er feststellte, dass die Tonhöhe gegen Ende eines langanhaltenden Tones ansteige [Mersenne 1636/IV, 208] [vgl. Kap. 2.4.4]. Da Aristoteles von einer frequenzabhängigen Ausbreitungsgeschwindigkeit ausgeht, scheint dies gut zusammenzupassen. Die Bestandteile eines zusammengesetzten Klanges kommen dann beim Rezipienten zu verschiedener Zeit an. Bloss müssten, da die hohen Töne sich seiner Auffassung zufolge schneller ausbreiten, die Klänge während ihres Verlaufs tiefer und nicht höher werden: Denn wenn die hohen Klangbestandteile früher beim Rezipienten ankommen, werden sie dort auch früher enden.

Aristoteles geht ferner davon aus, dass die tiefen Töne aufgrund ihrer grösseren Masse schneller zu Boden fallen. Deshalb wirken Klänge aus der Ferne gehört höher. Die Schallausbreitung bei Aristoteles ist also weder frequenzunabhängig noch geradlinig. [Aristoteles, Problemata XI, 6, 107-108]



Tonhöhenabhängigkeit der Schallausbreitung bei Aristoteles. Die gestrichelten Linien verbinden Schallteilchen, die gleichzeitig von der Schallquelle weggeschleudert wurden.

Schall ist für Mersenne ein Schlagen der Luft, das vom Gehör rezipiert wird. Am Ort des Empfängers, der von dem sich kugelförmig ausbreitenden Schall getroffen wird, kommt es zur Hörwahrnehmung. Im Falle einer Wellentheorie der Schallübertragung wird dabei aus einer Welle eine Schwingung (Zeitfunktion bei festem Ort, als Luftdruckschwankung), im Falle der vom ihm diskutierten Korpuskeltheorie hingegen treffen die Schallteilchen das Hörorgan in Form von Impulsen, die am Hörorgan direkt in Nervenimpulse umgewandelt werden könnten. Mersenne findet keinen zwingenden Grund bei Schall einen Materietransport (fliegende Schallpartikel) von der Quelle zum Empfänger anzunehmen:

Quelques-vns s'imaginent que la mesme partie de l'air qui est battuë, & qui fait le Son, se divise en vne infinité de petites parcelles, semblables aux atomes de Democrite, qui s'estendent en rond pour porter le Son de tos costez: mais cela n'est pas necessaire; & il n'y a nulle raison qui puisse persuader que la partie de l'air qui est frappé, se detache de l'air auquel elle est continuë, pour aller se reioindre à vn autre air esloigné de deux ou trois mille pas: il suffit qu'elle esbranle l'air continu, & qu'elle lui communique le mesme mouuement qu'elle a receu, quoy que plus foiblement & avec diminution. [Mersenne 1636, 9-10]

Einige stellen sich vor, dass derjenige Teil der Luft, die geschlagen wird und die den Ton erzeugt, sich in eine Unzahl kleine Teile zerlegt, ähnlich den Atomen von Demokrit, die sich rundherum ausbreiten um den Ton in alle Richtungen zu tragen; aber dies ist nicht notwendig und es gibt keinen überzeugenden Grund dafür, dass der Teil der Luft der geschlagen wird, sich von der umgebenden Luft löst, um sich mit der andern Luft, die zwei oder dreitausend Fuss entfernt ist zu verbinden; es genügt, dass sie die angrenzende Luft erschüttert und ihr die gleiche Bewegung, die sie empfangen hat, übermittelt, wenn auch schwächer und vermindert.

Beeckman dagegen ist ein klarer Verfechter des Materietransports [vgl. Kap. [2.4.2](#)]. Die Metapher des Dominoeffekts wird Mersennes Vorstellung der Schallausbreitung in hohem Masse gerecht. Die Identität beziehungsweise Isomorphie der Bewegung an verschiedenen Orten des Raumes garantiert für verschiedene ZuhörerInnen auch vergleichbare Schwingungen im Kopf.

2.3. Dimension: Raum der Töne, Dimensionen des Tons

Der Dimensionsbegriff in Zusammenhang mit der Sinneswahrnehmung und der Musik spielt bei allen untersuchten Quellen der ersten Hälfte des 17. Jahrhunderts in unterschiedlicher Weise eine Rolle. Während Mersenne die Frage nach einer Korrespondenz zwischen der Gestalt der Musikinstrumente und der von ihnen produzierten Töne aufwirft, interpretiert Praetorius ein Musikstück als eingebettet in eine dreidimensionale Struktur, schliesst aber für die qualitativen Merkmale der Töne eine solche räumliche Interpretation prinzipiell aus. Descartes' Theorie der Wahrnehmung beschäftigt sich mit der Kontaktstelle Mensch/Aussenwelt, an der räumliche Information in flächige Eindrücke verwandelt werden.

Mehr als bei Mersenne und Praetorius rückt damit bei Descartes das wahrnehmende Subjekt ins Zentrum. Descartes' *Géometrie* ein *Annexe* zum *Discours de la méthode* von 1637 – zeitgleich mit Mersennes *Harmonie universelle* veröffentlicht – bietet sich zusammen mit den *Regulae ad directionem ingenii* zur Deutung seines Dimensionsbegriffs und seiner Anwendung auf die Sinneswahrnehmung an.

Dimensionsbetrachtungen scheinen im Zusammenhang mit der Natur des Klangs erst wieder im Anschluss an Schönbergs Harmonielehre [1911] aktuell zu werden [vgl. Kap. 7].

2.3.1. Die drei Raumdimensionen und die Musik bei Praetorius

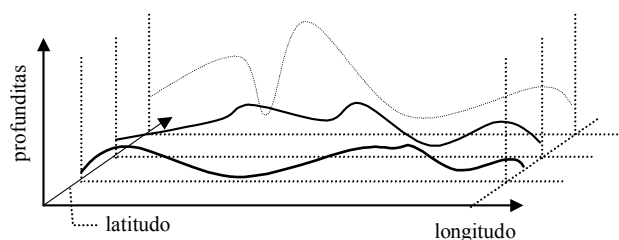
Die folgende Textstelle ist eine der wenigen, in denen Praetorius ein ästhetisches Thema – hier die Räumlichkeit der Musik – berührt. Sie ist in seiner Zweiteilung in Qualität und Quantität verankert [vgl. Kap. 2.1.3].

Ferner müssen wir auch eben denselben Klang oder Thon betrachten/ *quo ad quantitativam mensurationem*, nach der abmessung desselben.

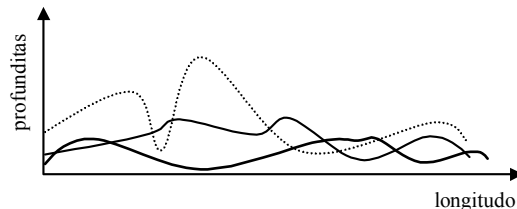
Uns dasselbe erstlich 1. *respectu longitudinis*, Ob derselbe Thon lang wehre und bestendig sey oder nicht. 2. *respectu latitudinis*, welche Instrumenta alle Stimmen und *Tonos* imitiren, repräsentiren, und an Tag geben können : Welche aber nur etliche Stimmen von sich lauten lassen / und welche nur einen Thon von sich geben. 3. *respectu profunditatis vel elevationis & depressionis*, welche Instrument über ihren Natürlichen Thon können gezwungen und gebracht werden/ welche aber nicht. [Praetorius 1619/II, 6]

- Länge / *longitudo* : Dauerhaftigkeit (halten Instrumente ihre Intonation über die Zeit), Variabilität der Tondauer (Chlavichord vs. Orgel oder Streichinstrumente)
- Breite / *latitudo* : Mehrstimmigkeit Simultaneität verschiedene Stimmen stehen nebeneinander (voll-, mehr-, einstimmig)
- Tiefe / *profunditas* : Tonhöhendimension, können Instrumente auf einen andern Referenzton eingestimmt werden Kammerton vs. Chorton (= Kammerton - 1 Ganzton). Ist der Ambitus transponierbar?

Die ersten beiden Dimensionen, *longitudo* und *latitudo*, sind damit als Diachronizität und Synchronizität reine Zeitdimensionen. Die räumliche Auslegung der dritten Dimension wird stillschweigend vorausgesetzt: *profunditatis* ist Tonhöhe. Keine der Dimensionen wird mit sichtbaren Eigenschaften der Schallquelle in Verbindung gebracht. Daraus könnte eine räumliche Veranschaulichung eines mehrstimmigen Musikstückes der folgenden Art abgeleitet werden:



Eine Einzelstimme wird in der Ebene *longitudo/profunditas* zweidimensional gedeutet, die dritte Dimension entsteht erst durch die Überlagerung mehrerer solcher parallelen Stimmebenen. Diese Interpretation setzt die Wohldefiniertheit der Stimme beziehungsweise des Einzeltons voraus. Die Definition der Stimme ist nicht unproblematisch, was sich an der Diskussion der verbotenen Parallelen aufzeigen lässt [s.u.]. Die obige Grafik wirft die Frage der Projektion auf die *longitudo/profunditas*-Ebene entlang der Synchronizitätsachse und die Frage ihrer Umkehrbarkeit auf:



Die Herkunft eines Tones von einer bestimmten Stimme kann nicht ohne Weiteres aus seiner Projektion ermittelt werden, wenn Stimmkreuzungen zugelassen sind. Diese Zusammengehörigkeit kann aber über das Vorliegen von satztechnischen Fehlern entscheiden. Es ist Aufgabe der Instrumentierung und auch der Interpretation vielstimmiger Musik diese räumliche Struktur plastisch herauszuarbeiten. Grafisch genügt es, die sich in der Projektion durchkreuzenden Linien verschieden zu färben, und ihre Herkunft wird erkennbar. Eine solche Färbung kann in der Ausführung einer einheitlichen Artikulation oder einer einheitlichen Klangfarbe entsprechen. Die damit erzielte Durchsichtigkeit der Musik verleiht ihr die für das Verständnis erforderliche zusätzliche Dimension.

Das Zusammengehen mehrerer Instrumente und auch Vokalstimmen im Unisono oder auch in der Oktave erlangt insbesondere in Italien eine zunehmende Beliebtheit. Daraus ergeben sich Konflikte mit den Regeln des Kontrapunkts, denn die Stimmen eines polyphonen Satzes dürfen nicht beliebig oktavtransponiert werden, da die sich zur Oktave ergänzenden Quinte und Quarte nicht den gleichen Behandlungsregel unterliegen.

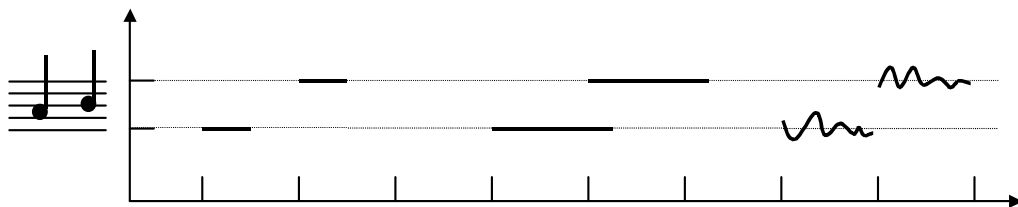
Das Parallelführen zweier Instrumente im Einklang oder in der Oktave ist dann legitim, wenn sie zusammen *eine Stimme* bilden, wenn also der mehrstimmige Satz nicht tangiert ist. Diese Zusammengehörigkeit hat eine semantische und eine akustische Komponente. Die Abfolge zweier Sextakkorde *f-a-d*, *g-h-e* hat bei einer Oktavverdoppelung der Mittelstimme nicht nur eine Oktav- sondern auch eine Quintparallele zur Folge, wenn die dazukommenden Töne als zusätzliche Stimme interpretiert werden: *f-a-d-a'*, *g-h-e-h'*. Damit eine solche Parallele akustisch nicht in Erscheinung tritt, muss garantiert sein, dass die Paare *a-a'* und *h-h'* zu einer Stimme, also zu Einzeltönen mit der vorgeschriebenen eindeutigen Tonhöhe (*a* und *h*), *verschmelzen*. Die parallel gehenden Tonpaare sollen, graphisch gesprochen, erkennbar der gleichen Zeit/Tonhöhen-Schnittebene angehören. In diesem Zusammenhang sind die kompromisshaften Vorschläge von Praetorius zur differenzierten Auslegung des Parallelenverbots zu sehen [vgl. Praetorius 1619/III, Termini Musici, 96-101, 118].

Ähnlich könnte auch der *Einzelton*, der in einer einzigen Bewegung – durch Streichen einer Saite, Zupfen eines Chorsaitenpaares oder Niederdrücken einer Taste – hervorgebracht wird, in seiner Unteilbarkeit fragwürdig werden. Die Orgelmixtur, die Oktavbestandteile beinhaltet, oder die „Quinta ad unam“ gefährden potenziell die Reinheit des Tonsatzes in der gleichen Art.

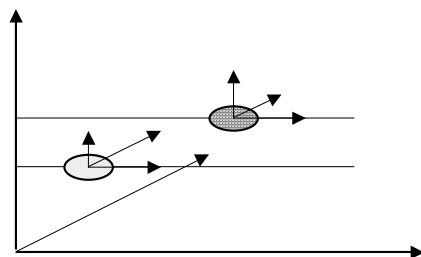
Bei der Beschreibungen eines ihn beeindruckenden Orgelpositivs nennt Praetorius die Klangbestandteile von Registerkombinationen, die aus gleichartigen Prinzipalpfeifen zu Grundton, Quinte und Oktave (2 : 3 : 4) bestehen, *discreti soni* und das Ergebnis klinge „als wenn ein Stimmwerck Querflöten zusammen accordirt und geblasen würden“. [Praetorius

1619/II, 79-80]. Die Klangbestandteile sind offenbar noch heraushörbar. Die Synthese hat, was aus dem Kontext klar hervorgeht, in Obertondisposition einen fehlenden Grundton, das heisst die Unteroktave zum „rechten Ton“ dürfte als Differenzton gehört werden, so dass der kleine Tonumfang der Orgel gegen unten um eine Oktave erweitert wird. Praetorius äussert sich allerdings nicht über den virtuellen Grundton und auch nicht zu den aus diskreter Sicht vorhandenen Quintparallelen.

Die beschriebene Dimensionszuweisung in den Raum eines Musikstückes ist aber nicht die einzig mögliche Interpretation der obigen Stelle. Die Einleitung bezieht sich explizit auf „denselben Klang oder Thon“, der hinsichtlich der drei Dimensionen quantifiziert werden kann. Die Beständigkeit in der Zeitdimension kann nämlich nicht nur auf die Dauer sondern auch auf die Konstanz der Tonhöhe bezogen werden, entweder über den Ton als singuläres Ereignis in der Zeit oder über einen grösseren Zeitraum als Konstanz der Stimmung.



Die Folge zweier Viertelnoten (a' - h') ergibt auf dem Clavichord gespielt bezüglich effektiver Tondauern in der Tonhöhen/Zeit-Ebene ein völlig anderes Bild als die gleiche Tonfolge von der Orgel legato oder von einer Violine vibrato vorgetragen. Eine einstimmige Melodie ist eben mehr als eine Folge von Punkten in der Ebene. Die Dauer eines Tones von konstanter Tonhöhe kann als Balken veranschaulicht werden. Sie ist dann als Attribut des Tones, der zur gegebenen Zeit auf der gegebenen Höhe einsetzt, anzusehen. Ganz ähnlich könnten auch die Lautstärke oder die Klangfarbe als lokale Attribute des Tones mit gegebener Einsatzzeit und Tonhöhe verstanden werden. Dem entspräche die Interpretation der Töne als mehrdimensionale Objekte.



Töne als Objekte in der Ebene Einsatzzeit/Tonhöhe. Neben ihre Position in Zeit und Tonhöhe kann ein Ton beliebig viele lokale Attribute, „Dimensionen“ haben: Dauer, Tonhöhenschwankung, Klangfarbenattribute. Diese sind in der Zeichnung als lokale Koordinaten durch Pfeile und durch verschiedene Musterung symbolisiert.

Allerdings sind diese Attribute mit Ausnahme der Dauer nicht in den Dimensionen des Raumes interpretierbar, in dem sie liegen. Gerade hier zieht Praetorius die Grenze zwischen qualitativer Erzeugung und quantitativer Messbarkeit. Die skizzierte Variabilität der Dauer vor dem Hintergrund eines festen diastematischen Rasters wird in der präzisierenden Passage zur Längendimension *longitudo* im Unterschied zum Aspekts der Konstanthaltung der Stimmung allerdings keines Wortes gewürdigt [Praetorius 1619/II, 6].

2.3.2. Die drei Raumdimensionen und die Musik bei Mersenne

Determiner si les Sons ont toutes sortes de dimensions, à sçavoir la longueur, la largeur et la profondeur, et qu'elles sont les autres propriétés, ou les Accidens du Son.

Encore que les trois dimensions de la quantité se rencontrent seulement dans les corps à proprement parler, l'on peut neantmoins les remarquer dans les accidens corporels, particulièrement lors qu'ils suivent lesdites dimensions; et qu'ils frappent differemment les sens, quand la quantité ou la figure des corps est differente; ce qui arriue aux Sons, comme i'ay desia remarqué, car il sont minces & deliez, lors que les corps dont il sont produits sont minces & subtils: mais il sont gros & massifs, quand les corps sont grands & gros, comme l'on experimente aux chordes des instrumens, & aux tuyaux d'Orgues. [Mersenne 1636/I, 28]

Bestimmung, ob die Töne alle Arten von Dimensionen, das heisst Länge, Breite und Tiefe, haben und welches die andern Eigenschaften oder Akzidentien des Tons sind.

Auch wenn sich die drei Dimensionen der Quantität im eigentlichen Sinne des Wortes nur in Körpern finden lassen, können sie dennoch in den körperlichen Akzidentien bemerkt werden, besonders wenn diese den genannten Dimensionen entsprechen, so dass sie die Sinne auf verschiedene Art schlagen, wenn die Grösse oder Gestalt der Körper verschieden ist; dies bewirkt für die Töne, wie ich schon bemerkt habe, dass sie dünn und fein sind, wenn die Körper, die sie hervorbringen, dünn und fein sind: aber sie sind gross und massiv, wenn die Körper gross und dick sind, wie man bei den Saiten der Instrumente und bei den Orgelpfeifen experimentiert.

Die räumliche Analogie bei Mersenne bezieht sich hier nicht auf die frequenz-zeitliche Bestimmung der Töne eines Stückes: Die Töne selbst sind *minces*, *subtils* oder *grands*. Sie sind selbst mehrdimensionale Objekte. *Qualité* und *dimension* werden dadurch zu sinnverwandten Ausdrücken. Im Gegensatz zu Praetorius findet sich bei Mersenne keine prinzipielle Unterscheidung in Quantität und Qualität. Auch die quantifizierbaren Attribute wie Tonhöhe oder Lautstärke werden Qualitäten genannt. Die „räumliche“ Verortung der Töne innerhalb eines Musikstückes steht dabei nicht zur Diskussion. Die Fokussierung auf den von seinem musikalischen Kontext losgelösten Ton erlaubt Mersenne eine andersartige Bestimmung der Dimensionen als Praetorius. Insbesondere ist die Breitendimension, die bei Praetorius auf die mehrstimmige Musikinterpretation bezogen ist, für spekulative Dimensionszuweisung frei.

Solche räumlichen Kennzeichnungen sind auf den ersten Blick kaum mehr als direkte Metaphern für die Gestalt der Schallquellen: Ein grosser Ton stammt von einem grossen Instrument. Mersennes Diskussion der Dimensionen will aber mehr als nur die Sprache erklären, welche räumlich besetzte Begriffe auf den Hörsinn metaphorisch überträgt. Das Hören ist ein abbildender Vorgang, ebenso wie das Sehen. Beide Sinne vermitteln Realitätserkenntnis über Bewegung. Die Beobachtung, dass verschiedene Gestalt eines klingenden Körpers verschiedene Schallwahrnehmungen induzieren, ist als Begründung brüchig: gerade an den von Mersenne angeführten Dimensionen der Orgelpfeifen zeigt sich, wie fragwürdig eine solche Eins-zu-eins-Korrespondenz ist. Die andere Richtung „gleiche Ursache ergibt gleiche Wirkung“ ist dagegen weniger problematisch. Allerdings gibt Mersenne selbst ein Beispiel, das den Gleichheitsbegriff herausfordert: zwei identisch geformte Tassen haben, wenn sie in gleicher Weise zum Klingen gebracht werden, einen verschiedenen Klang, wenn die eine einen gegen aussen unsichtbaren Riss hat. Für Mersenne ist hier deshalb der Hörsinn dem Sehsinn überlegen.

Das Festhalten an der figürlich-abbildenden Funktion des Hörens scheint viel eher zu einer Partikeltheorie zu passen, als zu der sich bei Mersenne abzeichnenden Wellentheorie. In den

sich an obiges Zitat anschliessenden schwer durchschaubaren Absätzen diskutiert Mersenne die Zuordnung der drei Dimensionen im Einzelnen und kommt dabei nicht zu klaren Ergebnissen [vgl. die vollständige Wiedergabe und Übersetzung im Anhang [E]]. Die Ursache für die Schwierigkeit liegt darin, dass Mersenne sich nicht darauf festlegen will, die räumliche Längendimension ein für alle Mal zeitlich zu interpretieren. Dieser Schritt wäre nämlich die Aufgabe der Mimesis-Theorie zugunsten einer abstrakten Quantifizierung in einem Raum mit heterogenen Koordinaten. Der Vergleich der Tonhöhe mit der Dichte eines Körpers ist ein Beispiel, das die Suche Mersennes nach geeigneten musikalisch-physikalischen Modellvorstellungen illustriert.

Auch wenn sich aus Mersennes dialektischem Verfahren keine endgültigen Zuordnungen ergeben, gehen seine Überlegungen klar über die im Symbolischen verhaftete Raumvorstellung von Praetorius hinaus.

Es können durchaus Parallelen zu Lickliders Klangfarbe als „multidimensional attribute“ gezogen werden. Die Räumlichkeit als Paradigma des Nachdenkens über das Wesen der Töne lässt sich also sehr weit zurückverfolgen.

Die Bewertung von Mersennes Dimensionszuordnung durch Hellmut Ludwig [Luwig 1935, 37] als „abwegig“, weil „die in diesem Punkte ganz entgegengesetzten Gebiete unmöglich auf rein mathematischem Weg zusammengebracht werden können, da sie von völlig verschiedenen Voraussetzungen ausgehen“ ist seinerseits im mathematisch-physikalischen Verständnis des Kritikers verhaftet und geht an der Sache vorbei. Die räumliche Interpretation heterogener Attribute ist in Mathematik und Physik nichts Aussergewöhnliches. Es liegt der Betrachtung schon dann ein solcher heterogener Raum zu Grunde, wenn Bewegungen als Funktionen der Zeit betrachtet werden.

Die Uneinheitlichkeit in Mersennes Zuordnungshypothesen ist bedingt durch seine im Vergleich zur Vorzeit tiefere Einsicht in die physikalische Natur des Schalles. Wenn Schall nur noch eine „schlagende Luftbewegung“ ist, die sich dem wahrnehmenden Individuum mitteilt, wie lassen sich da seine gleichsam physischen Eigenschaften, die in der Alltagssprache über Töne ihren Niederschlag gefunden haben, noch erklären? Ist die Metapher, der Objektcharakter der Töne denn unter dem neuen Paradigma der geschlagenen und schlagenden Luft noch haltbar?

2.3.3. Dimension und Sinneswahrnehmung bei Descartes

Die vierzehnte der *Regulae ad directionem ingenii* definiert Descartes' Dimensionsbegriff in einer Weise, die sich mit dem heutigen physikalischen Gebrauch dieses Begriffs deckt:

Per dimensionem, nihil aliud intelligimus, quàm modum & rationem, secundum quam aliquod subjectum consideratur esse mensurabile: adeò ut non solum longitudo, latitudo, & profunditas sint dimensiones corporis, sed etiam gravitas sit dimensio, secundum quam subjecta ponderantur, celeritas sit dimensio motûs, & alia ejusmodi infinita. Nam divisio ipsa in plures partes æquales, sive sit realis, sive intellectualis tantum, est propriè dimensio secundum quam res numeramus; & modus ille qui numerum facit, propriè dicitur

Unter Dimension verstehen wir nichts anderes als die Bestimmung und Beziehung, in der ein Gegenstand als meßbar betrachtet wird, so daß nicht nur Länge, Breite und Tiefe Dimensionen eines Körpers sind, sondern auch die Schwere eine Dimension, gemäß der Gegenstände gewogen werden, Geschwindigkeit eine Dimension der Bewegung und unendlich vieles andere dergleichen. Denn eben diese Einteilung in mehrere gleiche Teile, sei sie nun wirklich oder nur gedanklich, ist im eigentlichen Sinne die

esse species dimensionis, [...] [Descartes, Regulæ ad directionem ingenii, Regula XIV, 1966, 67]

Dimension, nach der wir Gegenstände zählen, und jene Bestimmung welche die Zahl erzeugt, wird im eigentlichen Sinne Dimensionsart genannt [...] [Gäbe 1972, 68-69]

Die Dreidimensionalität unserer „realen Welt“ hindert uns also nicht daran, uns Strukturen mit beliebig vielen Dimensionen auszudenken, denn der Dimensionsbegriff ist auf nicht a priori räumliche Situationen übertragbar:

Ex quibus patet, infinitas esse posse in eodem subjecto dimensiones diversas, illasque nihil prorsus superaddere rebus dimensis, sed eodem modo intelligi, sive habeant fundamentum reale in ipsis subjectis, sive ex arbitrio mentis nostræ fuerint excogitatae. [Descartes, Regulæ ad directionem ingenii, Regula XIV, 1966, 68]

Daraus geht hervor, daß es in demselben Gegenstande unendlich viele verschiedene Dimensionen geben kann und daß diese den ausgemessenen Gegenständen überhaupt nichts hinzufügen, sondern ganz auf dieselbe Art gedacht werden, mögen sie nun eine wirkliche Grundlage in den Gegenständen selbst haben oder nach unserer Willkür ausgedacht sein. [Gäbe 1972, 69]

In der zwölften Regel, die den ersten von drei geplanten Teilen beschliesst, formuliert Descartes eine mechanistische allgemeine Theorie der Sinneswahrnehmung 12. Regel [vermutlich zw. 1626 und 1628, vgl. Krämer, 1991 201] :

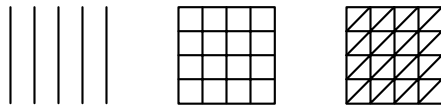
Concipiendum est igitur primò, sensus omnes externos, in quantum sunt partes corporis, etiamsi illos applicemus ad objecta per actionem, nempe per motum localem, propriè tamen sentire per passionem tantùm, eadem ratione quâ cera recipit figuram à sigillo. Neque hoc per analogiam dici putandum est, sed planè eodem modo concipiendum, figuram externam corporis sentientis realiter mutari ab objecto, sicut illa, quæ est in superficie ceræ, mutatur à sigillo. Quod non modò admittendum est, cùm tangimus aliquod corpus ut figuratum, vel durum vel asperum, &c., sed etiam cùm tactu percipimus calorem, vel frigus et similia. Item in aliis sensibus, nempe primum opacum, quod est in oculo, ita recipere figuram impressam ab illuminatione variis coloribus indutâ, & primam aurium, narium, & linguæ cutem, objecto imperviam, ita novam quoque figuram mutuari à sono, odore, & sapore. [Descartes, Regulæ ad directionem ingenii, Regula XII, 1966, 41]

Man muß sich also erstens vorstellen, daß alle äußeren Sinne, soweit sie leibliche Organe sind, obgleich wir sie den Objekten durch eine Handlung, durch eine Ortsbewegung nämlich, zuwenden, dennoch nur passiv im eigentlichen Sinne wahrnehmen, in der gleichen Art wie das Wachs seine Figur vom Siegel empfängt. Auch darf man nicht glauben, dies sei nur als Analogie gemeint, sondern man muß sich vorstellen, daß die äußere Gestalt des empfindenden Körpers wirklich vom Objekt ganz auf dieselbe Weise verändert wird wie die der Oberfläche des Wachses vom Siegel. Dies muß nicht nur angenommen werden, wenn wir einen Körper als gestaltet oder hart oder rauh usw. ertasten, sondern auch, wenn wir mit dem Tastsinn Wärme oder Kälte und Ähnliches wahrnehmen; ebenso bei den anderen Sinnen, nämlich daß das erste Undurchsichtige im Auge auf diese Weise eine Figur empfängt, die ihr von dem verschieden gefärbten Licht eingedrückt wird, und daß die erste für das Objekt unpassierbare Haut der Ohren, der Nase und der Zunge auf eben die Weise eine neue Figur vom Ton, vom Duft und vom Geschmack annimmt. [Gäbe 1972, 40]

Sibylle Krämer schreibt in diesem Zusammenhang:

Alle Sinnesempfindung ist also "impressio" im wörtlichen Sinne von Ein-druck, [...] Jede Sinnesempfindung ist als ein mechanistischer Übertragungsvorgang anzusehen, bei welchem Verschiedenheiten von Außenweltreizen als Verschiedenheiten zweidimensionaler Figuren ausgedrückt, oder besser: aufgedrückt werden [...]. [Krämer 1991, 206]

Die Metapher des Sigels: *Mimesis*. In Wirklichkeit ist die dem Wachs durch das Siegel aufgeprägte Struktur drei- und nicht zweidimensional. Seine äusserliche Beschaffenheit erlaubt den Rückschluss auf die Oberflächenbeschaffenheit der Objekte der Aussenwelt. Unter diesem Vorbehalt scheint Krämers Deutung der Wahrnehmungsauffassung Descartes' als Projektionen auf zweidimensionale Wahrnehmungsebenen dennoch plausibel. So interpretiert Descartes die Farben – als Struktureigenschaften der Gegenstände und der zugehörigen Sinneseindrücke – als repetitive Muster [Descartes, *Regulæ ad directionem ingenii*, Regula XII, 1966, 42]



und er begründet dies mit einem Minimalitätsargument:

[...] cū figurarum infinitam multitudinem omnibus rerum sensibilibus differentiis exprimendis sufficere sit certum. [Descartes, *Regulæ ad directionem ingenii*, Regula XII, 1966, 42]

[...] da die unendliche Vielheit der Figuren sicherlich ausreicht, um alle Gegenstände der sinnlichen Wahrnehmungen auszudrücken. [Gäbe, 1972, 41]

Sinnesempfindungen sind also Projektionen des dreidimensionalen Raumes auf Ebenen. Wahrgenommen werden zweidimensionale Strukturen, die mit den ungefärbten geometrischen Objekten der Planimetrie korrespondieren [Krämer, 206].

Gemäss Krämer ist diese zweidimensionale Struktur der Wahrnehmung Grund dafür, weshalb Descartes' geometrisch konstruktive Interpretation der Rechenoperationen nicht dem Homogenitätsprinzip der Dimensionen folge. Letzterem zufolge wären Produkte zweier linearer Grössen zwingend zweidimensional (Länge x Länge = Fläche) und Produkte dreier linearer Grössen dreidimensional (Länge x Länge x Länge = Volumen) zu deuten. Der tiefere Grund dafür ist meines Erachtens aber ein rein algebraischer. Alle zulässigen algebraischen Rechenoperationen sind höchstens *zweistellig* oder auf solche *reduzierbar*. Damit eine Verkettung der elementaren Rechenoperationen wie beispielsweise $a \cdot b - c$ oder $\sqrt{a} + b$ nämlich geometrisch konstruierbar wird, müssen alle Ergebnisse von Operationen wechselseitig als lineare oder flächige Grössen gedeutet werden können. Sonst können diese Ergebnisse nicht wieder als Eingabegrössen beliebiger neuer Operationen fungieren. Descartes legt Wert darauf zu zeigen, dass alle Rechnungen – also auch Verknüpfungen – geometrisch gedeutet werden können. Dies lässt die Algebra als Teil der Geometrie erscheinen, als solcher ist sie sinnvoll. Da andererseits die geometrischen Kurven – sie sind es gemäss Descartes' Definition – als Gleichungen algebraisch interpretierbar sind, werden Algebra und Geometrie zu gleichberechtigten Disziplinen.

Die Ebene ist die minimale Struktur, in der die (zeitgenössische) Algebra konstruiert werden kann. Die Interpretation einer Fläche als Linie ist eine Verminderung der Dimensionszahl um 1, das Pendant zu den Projektionen des Raumes auf die Ebene, mit welcher der Einheitswürfel auf das Einheitsquadrat abgebildet wird. (Die heute "algebraisch" genannten Kurven heissen bei Descartes deshalb "geometrisch", weil die ihnen zugrundegelegten Rechenoperationen geometrisch konstruierbar sind.)

Descartes bewegt sich in der obigen Deutung der Sinneswahrnehmung im Umkreis des

zentralen Problems der projektiven Geometrie: wie kann der Raum aufgrund seiner zweidimensionalen Ansichten – durch die Sinne – konstruiert werden. Die gegenseitige Repräsentierbarkeit der Dimensionen „gründet“ gemäss Krämer [Krämer 1991, 204] in Descartes' Einsicht in ihren „normativen Charakter, d.h. in ihrer Eigenschaft vom Verstand erschaffen und nicht ontologisch vorgefunden zu sein“. Der Raum wird also konstruiert und nicht bloss rekonstruiert. Die minimale Struktur, welche die zweidimensionalen Sinneseindrücke widerspruchsfrei deuten kann, welche die zweidimensionalen Ansichten zu einer konsistenten Weltsicht integriert, ist (zu jedem Zeitpunkt) dreidimensional. Der Flächenbegriff wäre demnach im Unterschied zum Raumbegriff zu den angeborenen Ideen zu rechnen. Daraus ergibt sich, dass der Unterschied zwischen angeborenen und erworbenen Ideen auf die Tiere ausgedehnt werden könnte, denn eine Katze hat beim Jagen einer Maus, den Raum empirisch durchaus im Griff. Dies wiederum widerspricht Descartes' mechanistischer Deutung der Tiere.

Das typisch mathematische Vorgehen der Reduktion eines Problems auf eine *minimale* Struktur (der Veranschaulichung) lässt sich in Descartes' *Géometrie* an verschiedenen Stellen nachweisen und korrespondiert mit seinen methodischen Forderungen in den *Regulae* [Nr. XIV, 23-24, XV]. Das Studium der höherdimensionalen polynomialen Gleichungen, das Hauptthema der *Géometrie* hat zum Zweck, diese auf solche tieferer Dimension zu reduzieren. Der Hauptsatz der Algebra besagt, dass jedes Polynom in quadratische und lineare Faktoren zerlegbar ist.

Seit der Erfindung der Schrift wird Information optisch – aus ökonomischen Gründen primär zweidimensional und nicht drei- oder eindimensional – gespeichert. Galileo Galileis Metapher des Buches der Natur, das in geometrischen Figuren geschrieben sei, scheint in eine ähnliche Richtung des Vorranges zweidimensionaler geometrischer Strukturen für die Wahrnehmung und für die Kommunikation zuweisen:

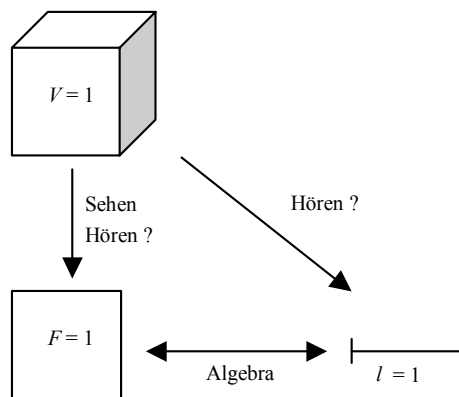
La filosofia è scritta in questo grandissimo libro che continuamente ci sta aperto agli occhi (io dico l'universo), ma non si può intendere se prima non s'impara a intendere la lingua, e conoscer i caratteri, ne' quali è scritto. Egli è scritto in lingua matematica, e i caratteri sono triangoli, cerchi ed altre figure geometriche, senza i quali mezzi è impossibile a intenderne umanamente parola; senza questi è un aggirarsi vanamente per uno scuro laberinto. [Il saggiaiore (1623), Le opere di Galileo Galilei. Nuova ristampa della edizione nazionale, Florenz 1965/66, Bd. VI, 232, zitiert nach Engfer 1982, 99]

Die Philosophie ist in diesem grossartigen Buch, das uns unablässig offen vor Augen steht (nämlich dem Universum) geschrieben, aber man kann es nicht verstehen, wenn man nicht vorher die Sprache zu verstehen lernt und die Buchstaben kennt, in denen es geschrieben ist. Es ist in einer mathematischen Sprache geschrieben, und die Buchstaben sind Dreiecke, Kreise und andere geometrische Figuren, ohne diese Hilfsmittel ist es dem Menschen unmöglich ein einziges Wort zu verstehen; ohne diese ist es ein vergebliches Umherschweifen in einem dunklen Labyrinth.

Räumliche Geometrie ist nur über ihre Projektionen auf Ebenen geometrischen Konstruktionen zugänglich. Mit der Entdeckung der Gesetze der Perspektive durch Brunelleschi (1376-1446) tritt die projektive Natur der optischen Wahrnehmung allmählich ins Bewusstsein. Es gibt keine einfachen Konstruktionswerkzeuge, die beispielsweise die Herstellung einer Kugelfläche erlauben, und das Lösen von Schnittaufgaben im Raum erforderte komplizierte handwerkliche Verfahren. [Vgl. Descartes, *Geometrie*, 1969, 19-21] Durch die Algebraisierung geometrischer Strukturen versetzt sich Descartes in die Lage, Geometrie in beliebig vielen Dimensionen zu betreiben. Die Visualisierbarkeit in **zwei**

Dimensionen auf Papier ergibt sich aus der Beschränkung auf Gleichungen mit nur **zwei** Unbekannten.

Gilt die Reduktion der Dimension von 3 auf 2, wie sie für den Sehsinn nahe liegend erscheint, auch für den Hörsinn? Die Frage ist für das philosophische Verständnis des Hörens bedeutsam. Einem modernen Verständnis des Schalls als Luftdruckschwankung entspricht viel eher eine Reduktion der Dimensionszahl von 3 auf 1 aus: Schall wird am Ort des Empfängers (bei einohrigem Hören) zu einer eindimensionalen Schwingung. Die Feststellung des Pegels ist zu jedem Zeitpunkt die einer eindimensionalen Grösse. Der Pegelverlauf lässt sich demnach als Funktion der Zeit in zwei Dimensionen als statische Grafik veranschaulichen. Diese Sicht versteht das Trommelfell als punktförmigen Sensor und nicht als flächig ausgedehnt.



Projektive Natur der Wahrnehmung. Beim (einäugigen) Sehen bzw. (einohrigem) Hören entsteht zu jedem Zeitpunkt ein flächiger Eindruck auf Retina bzw. Trommelfell. Dagegen ist der Schalldruck zu jedem Zeitpunkt eine eindimensionale Grösse. Die geometrische Konstruierbarkeit der arithmetischen Rechenoperationen beruht auf der Gleichsetzung der Einheitsfläche mit der Einheitsstrecke.

Denkt man sich dagegen Schall im Sinne der Partikeltheorie als fliegende Kügelchen gewinnt eine zweidimensionale Deutung an Plausibilität: Das Trommelfell wird bei der Wahrnehmung von einem Regen eventuell verschieden grosser Kügelchen getroffen und es erhält zu jedem Zeitpunkt eine charakteristische zweidimensionale figürliche Konstellation eingedrückt, die dann ans Gehirn weitergeleitet wird. Eine grafische Veranschaulichung der Veränderung der Konfiguration auf dem Trommelfell ist damit dreidimensional, und eine dynamische Darstellung entspricht einem zweidimensionalen Film. So gesehen gibt es zwischen Seh- und Hörsinn keine prinzipiellen Unterschiede. Dieser Auffassung ist eine einheitliche Theorie der Ausbreitung von Schall und Licht eine Partikeltheorie, wie sie für Descartes – zumindest zeitweise – anzunehmen ist, adäquat.

Da es allerdings dem durch keinen anderen Sinn unterstützten Gehör offenbar nicht möglich ist, eine Schallquelle so zu rekonstruieren, dass zum Sehsinn isomorphe räumliche Vorstellungen erweckt werden, ist er dem Sehsinn unterlegen [Descartes 1649, *Les passions de l'âme*]. Das Gehör ist nicht immer in der Lage eine Orgelpfeife, von einer *trompette marine* oder von einer Trompete zu unterscheiden (Nichterkenntnis der räumlichen Gestalt). Ebenso ist die Entfernungs- und Richtungsbestimmung zu einem klingenden Körper unzuverlässig. Demgegenüber führt der Sehsinn gewöhnlich zu keinen unauflösbaren Inkongruenzen mit dem Tastsinn.

Die obige Interpretation der Farbe als Muster ist unter dem Gesichtspunkt der Partikeltheorie, wie sie später von Newton verfochten wird, zu interpretieren – eine Wellenlehre für Licht wird erstmals 1690 von Christiaan Huygens aufgestellt, sie soll aber schon bei Descartes 1637 vorgezeichnet sein [vgl. J. J. O'Connor and E. F. Robertson, *Light through the ages: Ancient Greece to Maxwell*, Aug. 2002, <http://www-groups.dcs.st-and.ac.uk/~history/HistTopics/Light_1.html> (Juli 03)]. Für die Partikeltheorie gibt es zwei Möglichkeiten: Entweder haben die einzelnen Lichtpartikel selbst eine strukturierte Oberfläche und übertragen diese auf das Auge, oder mehrere Partikel sind zu festen Raumkonstellationen (Molekülen) verbunden. Im zweiten Fall werden die Lichtpartikel als identische Atome verstanden, und die Farbe ist eine molekulare Struktureigenschaft, deren Abdruck auf der Retina Ursache der Farbwahrnehmung ist.

Möglicherweise ist Descartes' späteres negatives Urteil [„ridicule“: vgl. Bailhache 2001, 59] über Beeckmans Schallpartikelthorie auch in der inzwischen persönlichen Abneigung begründet.

Die Reduktion der Dimension als Charakteristikum der Wahrnehmung erklärt Descartes' Auffassung von der prinzipiellen Unvollkommenheit der menschlichen Sinne.

2.4. Obertöne: Vielheit in der Einheit

Das Thema Schallsynthese kommt bei Praetorius ausgiebig zur Darstellung, ist aber nie Anlass zu theoretischer Reflexion. Das damit zusammenhängende psychoakustische Phänomen der Verschmelzung wird von den andern Autoren tangiert, so auch bei Beeckman in seiner Konizidenztheorie der Konsonanz. Descartes legt seiner nicht weiter physikalisch fundierten Konsonanzauffassung im *Compendium* die Oktavidentität zu Grunde und rückt in seiner Herleitung von Tonsystem und Akkorden in die Nähe Rameaus, ohne allerdings Rekurs auf die Obertonreihe zu nehmen. Aus seiner Perspektive dürfen Obertöne – die er später in der Korrespondenz mit Mersenne als physikalisch bedingte Unannehmlichkeiten ansieht – für die axiomatische Fundierung der Musik keine Rolle spielen. Mersenne dagegen beobachtet bei allen gebräuchlichen Arten der Tonerzeugung Obertöne, erkennt die Klänge analytisch als zusammengesetzt, sieht aber – mangels fundierter Kenntnisse der Orgel? – obschon er ihn vermutet, keinen gesicherten Zusammenhang zur Klanqualität. Deshalb kann er aus der derzeitigen Synthesekunst, wie sie bei Praetorius beschrieben ist, kein theoretisches Kapital schlagen. Poisson referiert zwar ausführlich die Koinzidenztheorie Beeckmans, scheint aber die Obertöne nicht zu kennen. Auch er erkennt den Ton einer gezupften Saite als zusammengesetzt und kommt – aufgrund einer physikalisch unhaltbaren Modellierung – zu einer eindimensionalen Klassifizierung der gezupften Saitentöne.

Überblickt man die zahlreichen verstreuten Bemerkungen zur Teiltonhaltigkeit der Töne von Musikinstrumenten und sogar der Stimme in der *Harmonie universelle* zeugt Riemanns Formulierung

MERSENNE kommt der Entdeckung des Phänomens der *Obertöne* sehr nahe, da er den *Grad der Konsonanz* abhängig macht von der Stärke des Mitschwingens einer Saite beim Erklingen des Tons einer anderen [Riemann 1921, 398]

schon von einer erstaunlichen Geschichte zugeschütteten Wissens, insbesondere da die Vielheit der Töne bei Mersenne sogar in Titelüberschriften wie „*Determiner pourquoi vne chorde touchée à vuide fait plusieurs sons en mesme temps*“ greifbar ist. Es kommt einem

schon der Verdacht, als wäre die Vielheit in der Einheit des Tons ein genauso gefährlicher Apfel vom Baum der Erkenntnis wie das heliozentrische Weltbild.

2.4.1. Praetorius

Eine einzige „einstimmige“ Schallquelle kann zur gleichen Zeit mehrere Töne hervorbringen. Dies stellt Praetorius in seiner Besprechung der *Quintadena* („Quinta ad Unam“) fest. Er kennt auch die Methode, Klänge nach dem Prinzip der harmonischen Folge zu synthetisieren, die eine einzige Stimme darstellen und eine eindeutige Höhe zu haben scheinen. Dieses Vorgehen als „Disposition nach dem Obertonprinzip“ [Peter Schubert 1984, 15] zu bezeichnen, ist allerdings irreführend, denn es wird damit eine Einsicht in die zusammengesetzte Natur gewöhnlicher Töne suggeriert.

[Gedackte Pfeiffen]

[Quintadehna]

Es ist diese Stimme nicht lange/ sondern etwa 40. oder 50. Jahr im Gebrauch gewesen/ wie sie denn in alten Orgeln nicht gefunden wird; Und ist eine liebliche Stimme (von etlichen Holschelle genennet) darinnen zweene unterschiedliche Laut/ als die *Quinta, ut, sol*, im Gehör zu vernehmen seyn; Daher sie anfänglich *Quinta ad una* genennet worden; [Praetorius 1619/II, 137]

Quinta ist hier als „Quinte modulo Oktave“, das heisst als Duodezim zu verstehen. Bei den gedackten Pfeifen treten die Partialtöne gerader Ordnung in der Regel zurück. Es handelt sich demnach um einen Klang mit fehlendem ersten Oberton, und nicht um einen Klang mit fehlender Grundtonkomponente.

Schlüsselbegriffe sind *Laut* und *Stimme*. In der späteren physikalischen Terminologie von Koch/Helmholtz korrespondieren sie mit *Ton* und *Klang*. Nicht zufällig vermeidet Praetorius hier das Wort *Thon*. Dadurch braucht er die Mehrdeutigkeit der Tonhöhe nicht zu thematisieren. Der Begriff *Stimme* kann auf eine oder mehrere simultan erklingende Schallquellen bezogen werden. Es scheint zwingend, dass eine Stimme eine eindeutige *Tonhöhe* – nicht bloss eine eindeutige *Tonizität* – haben muss, die ihrer Positionierung im Liniensystem der Notenschrift entspricht. Die Tonhöhe ergibt sich aus den „an Thon Fuss“-Zahlen. Diese bezeichnen nicht die Länge der betreffenden Pfeife, sondern die Länge einer Referenzpfeife gleicher Tonhöhe (Prinzipal). Die Tonhöhe einer Mixtur ergibt sich als kleinstes gemeinsames Vielfaches der „an Thon Fuss“-Zahlen ihrer Komponenten. Durch Anwendung dieses formalen Verfahrens ist die Höhe einer Stimme ungeachtet ihrer Entstehung eindeutig bestimmt. Das Eingeständnis einer zweifachen Tonhöhe hätte im Falle der *Quintadena* für die Satztechnik entweder das Aufstellen einer „Duodezimen-Identität“, die Aufhebung des Quintparallelenverbotes oder das Verbot der *Quintadena* zur Folge! Durch Modifikationen in der Bauweise lässt sich das Partialamplitudenverhältnis der beiden *Laute* steuern:

[Nachthorn]

Es wird aber diese kleine Quintadeena von etlichen Orgelmachern an der Mensur, Jedoch uff gewisse masse erweitert/ und daher/ weil sie aus solcher erweiterung einen Hornklang bekömpft/ und die *Quinta* etwas stiller darinnen wird) Nachthorn geheissen. [...] Es mag aber diese Art ebenmessig zu vielen andern Stimmen gar lieblich und mannigfaltig verendert werden.

Aus dieser Mensur oder Art kömmt auch der Nachthorn Baß/ beydes von 4 Fuß so denn auch von 2. Fuß Thon her/ und ist eine zierliche Stimme/ bevorab im Baß anzuhören.

Die Niederländer arbeiten das Nachthorn offen/ wie eine Holflöite/ doch oben umb etwas enger/ und brechen allmehlich immer etwas ab/ ist auch im Labio nicht so hoch uffgeschnitten/ als die Holflöit/

daher es einen sonderlichen Klang bekömpt/ gleichsam als wie einer zuchete oder schluggete.
[Praetorius 1619/II, 138]

Praetorius weist hier – am Beispiel – ganz deutlich auf einen Zusammenhang zwischen Teiltonaufbau und Klangqualität hin: der *Hornklang* ist an die „etwas stillere Quinta“ geknüpft. Eine Verallgemeinerung zu einem Gesetz über Klangqualitäten scheint Praetorius zu scheuen.

Die Quintadena wird auch in Mixturen verwendet:

[Grosse Quintadeen 16. Fuss Thon.]

Diese Stimme ist Manualiter und Pedaliter, wenn eine andere Stimme von 8 f. Dazu genommen wird/ ganz lieblich zu gebrauchen und zu hören. [Praetorius 1619/II, 137]

Die hinzugenommene Stimme stellt das Gleichgewicht im Teiltonaufbau wieder her, indem sie der Quintadena ihre fehlenden geradzahligen Teiltöne zurückgibt. Das Gewicht der Quinte (modulo Oktave) ist hierdurch vermindert.

Also:

A	1 Pfeife = 2 Laute ?= 1 Stimme	Quintadena
B	2 Pfeifen = (2 Laute) + 1 Stimme = 1 Stimme	Quintadena + fehlender 1. Oberton

Eine Pfeife kann mehrere Töne zugleich erzeugen und mehrere zusammen einen einzigen. Der zusammengesetzte Charakter der Stimmen ist damit in beiden Richtungen analytisch und synthetisch erkannt und wird im Orgelbau ausgenützt. Das Verhältnis der Partialamplituden entscheidet darüber, ob eine Synthese den Status eines Akkordes (ohne eindeutig bestimmte Tonhöhe) oder eines Klanges (*sonus* mit eindeutiger Tonhöhe) erhält:

Partialton Nr.	1	2	3		
A (Intensitäten)	2	0	1	Spaltklang	2 Töne
B (Intensitäten)	2	1	1	Verschmelzung:	1 Ton

Ein „Spaltklang“ gilt bei Praetorius, wie sich aus dem Kontext ergibt, eine missratene Synthese.

Die Praetoriuszeit kennt auch Orgelmixturen, die Terz und Quinte (in geeigneter Oktavlage) verwenden:

[Zimbeln]

Klingende Zimbel/3. Pfeiffen starck *repetiret* durch ganze *Clavir* in f und in \bar{c} / und wird also gesetzt *fa* \bar{c} : welches die kunstreichste seyn soll. [Praetorius 1619/II, 131]

„*repetiret*“: In verschiedenen Oktaven gleichnamige Töne zu einem Register zusammenstellen.

Der *senario* von Zarlino wird hier also voll ausgereizt. Es ist offenbar selbstverständlich, dass aus den Tönen eines Durdreiklangs Klänge mit eindeutiger Tonhöhe fabriziert werden können.

Eine Stelle in Zusammenhang mit dem *falso bordone* gibt weiter Aufschluss über das natürliche Bauprinzip für Akkorde und Töne: „falso“ im Begriff *falso bordone* wird dadurch

erklärt, dass der Verkettung von Sextakkorden kein echter Bass zugrunde liege und die Terz nicht an ihrem natürlichen Ort platziert sei:

Denn die *Tertia* hat ihren natürlichen Sitz nicht *in sonis gravibus & inferioribus*, sondern *in sonis acuti & superioribus*.

3. Und wie fürs dritte *Bordone* eine grosse Hummel/ welche daher rauschet/ summet und brummet/ *interpretiret* wird: Also gibt diese Art keine liebliche/ sondern rauschende/ summende und brummende *Harmoniam*: Und solches wegen folgender Ursachen. Erstlich weil die *Tertia* ihren *locum naturalem* hat *in sonis superioribus*, wie aus den *numeris Harmonicis radicalibus & proportionalibus* 1.2.3.4.6.8 und folgenden *Schematismo* zu ersehen.

Denn 1. und 2. bestätigt eine *Octavam in sonis inferioribus*. Wie aber zwischen 1. und 2. keine andere mittelmittelzahl also ist zwischen G und g weder *Quinta* noch *Tertia*. 2. und 3. aber bestätigt eine *Quintam*; Wie 3. und 4. eine *Quartam in sonis intermediis*. Es kan aber gleicher gestalt die *Quintam in Tertiam Majorem* und *Minorem* (wegen daß/ das zwischen 2. und 3. keine mittelmittelzahl) nicht abgetheilet werden. Endlich bestätigt 4. und 5. *Tertiam Majorem*: 5. aber und 6. *Tertiam minorem in sonis acutis & superioribus*.

Hieraus sihet man nun/ daß die *Tertia* ihren *Locum naturalem* nicht *in sonis gravibus*, sondern *in acutis* habe: Und weil die *Harmonia* am besten/ in welcher die *Consonantiae* an ihren gebührenden und natürlichem orte gesetzt werden/ und die *Tertia in sonis acutis* eine liebliche *Harmoniam* machet: Als folget daraus/ daß sie *in sonis gravibus* einen trawrigen unlieblichen und rauschenden *concentum* zu wege bringet. Wie gleicherweise die *Octava in sonis acutis & superioribus* eine *hiulcam harmoniam* verursacht: Wie aus diesen *Schemate*, darinnen der *consonantiarum sedes* und *series naturalis invertiret* wird/ zu sehen. [Praetorius 1619/III, Termini musici, 10]

„hiulcus“ : klaffend, zerrissen

Die Folge der positiven ganzen Zahlen ist Grundlage der „natürlichen“ Akkordbildung. Da die Intervalle $n : (n+1)$ mit wachsendem n kleiner werden, ist der „natürliche Ort“ der kleineren Intervalle in den höheren Oktaven und derjenige der grösseren in den tieferen Oktavlagen. Die Zahl 7 wird kommentarlos übergangen. Diese natürliche Anordnung der Töne wird bei der Synthetisierung von Orgeltönen strikte angewendet. Und die 7 wird in Mixturen nicht verwendet. Die Zahlenfolge ist a priori „natürlich“, sie bedarf keiner weiteren Rechtfertigung mit „in der Natur vorkommenden“ Obertönen.

Ähnlich wie später Helmholtz behauptet er eine Abhängigkeit des Charakters der Intervalle von der Tonhöhe. Die Terz ist je nach Lage lieblich oder traurig, unlieblich und rauschend. Sogar die Oktave verändert ihren Klangcharakter in Abhängigkeit von der Tonhöhe. Darüber hinaus ist Konsonanz bei Praetorius sogar abhängig von der Klangfarbe [vgl. Kap. 2.6.1]

Ist also, wenn es mit einer Mixtur gelingt, den Klangeindruck eines bestehenden Instrumentes zu imitieren, damit erwiesen, dass dieser aus den Tönen des Durdreiklangs zusammengesetzt ist? Dies ist eine Frage nach Original und Fälschung; die Sinne lassen sich täuschen! Nimmt man die Sinneswahrnehmung, im Sinnes des aufkommenden Empirismus, als einzige Erkenntnisquelle, kann angesichts dieser Sachlage nur eine ungeheure Inkongruenz zwischen optisch-haptischer und akustischer Wahrnehmung konstatiert werden, solange an der Vorstellung einer mimetischen umkehrbaren Korrespondenz zwischen Wahrnehmungsgegenstand und Wahrnehmung festgehalten wird. Gibt man den optisch-haptischen Sinnesdaten den höheren Wahrheitswert, ist zu schliessen, dass verschiedenartige Dinge vom Gehör als identisch aufgefasst werden. Vielleicht haben diese Dinge etwas gemeinsam, das dem optisch-haptischen Doppelsinn entgeht: Das Gehör klassifiziert. Erinnern wir uns an die drei Dimensionen bei Praetorius: Die Horizontale wird mit der Zeit, die Vertikale mit der Tonhöhe und die Tiefe mit der Simultaneität gleichgesetzt. Die Klassifikation oder Täuschung findet in der Dimension der Simultaneität statt; je nach

Kontext fehlt dem Ohr die Tiefenauflösung wie bei einäugigem Sehen. Damit lassen sich Descartes' zweidimensionale projektive Sinneswahrnehmungen (anachronistisch) neu interpretieren: Während sich dem Auge die Tiefendimension erst über die implizite Anwendung der Perspektivengesetze erschliesst, kann das Gehör die Simultaneitätsdimension, das heisst die Identität der Stimmen erst unter Zuhilfenahme der Satzregeln und klanglicher Einheitlichkeitskriterien für Töne rekonstruieren. Lässt man die Tonhöhe als „quasi-räumliche“ Dimension gelten, kommt der Unterschied zwischen Seh- und Hörsinn zum Vorschein. Während nämlich der Sehsinn auf zwei räumliche Dimensionen projiziert, bildet der Hörsinn die klingenden Körper auf eine gemischte zweidimensionale Raum/Zeit-Ebene ab. Selbst wenn sich das Gehör durch die Simultaneität nicht täuschen liesse, wäre es ihm dennoch verwehrt, die Raumstruktur des Wahrnehmungsgegenstandes zu rekonstruieren, denn im Unterschied zum Auge entgehen ihm zwei und nicht bloss eine Raumdimension. Die qualitativen Merkmale von Praetorius, wie Lautstärke und *Resonanz*, dienen nur der Auflösung der Simultaneitätsdimension, ganz ähnlich wie Helligkeit und Farbe zur Klärung der Tiefendimension beitragen können.

2.4.2. Beeckman

Das folgende Briefzitat entstammt der Antwort auf Mersennes Anfrage zu den Obertönen.

[...] Dicam tamen ego quod sentio. Chorda tremora suo aera dispergens, eum in æquales ferè globulos frangit; attamen cùm omnes partes chordæ æquè quidem frequenter, sed non æquè celeriter tremant, et aliæ aeris particulæ alijs fortasse fragilioris sint, nec chordæ crassities ubique sit exactè æqualis, fit ut eorum globulorum quidam in duas, tres, quatuor etc. partes frangantur. Quæ in dues franguntur, *octavam* auribus repræsentant, quia eodem tempore duplici puncturâ afficuntur; hanc verò mens non percipit quia exilis cùm sit, unisono tam similis est ut pro eodem habeatur. At quæ in tres partes abeunt, plus dissimilitudines habentes, animo manifestiùs apparent. Qui in quatuor partes franguntur, idem quod illi qui in duas patiuntur; qui verò in quinque partes secantur, etiam satis manifestò percipiuntur, ita tamen ut ob similitudinem *duodecima* pro *quintâ*, et *septima-decima* pro *tertiâ* etiam habeatur, unde fit ut campanæ omnes bene compositæ, consonantiam *ut mi sol* resonare videantur. Quod autem *quinta*, quæ *duodecima* est, vel sola in quibusquam instrumentis (uti hîc in chordâ a te propositâ), vel præcipue ut in campanâ audiatur, non tantum fit, quia plures globuli in tres quàm in quinque partes franguntur, verùm etiam quia omnes, quoque illi qui in sex partes franguntur, *nona-decimam* (quæ et *quinta* est) repræsentant.

[Sed hæc post editum D. GASSENDI *Epicurum* (quem ad me a vobis non mitti, cùm jam prodixisse eum credam, et toties in litteris meis mentionem

[...] Ich sage also was ich höre/fühle: Eine Saite, die durch ihr Zittern die Luft zerstückelt, wenn alle Teile der Saite gleich häufig [zittern], bricht [jene] in gleich grosse Kügelchen, aber wenn sie nicht gleich schnell zitterten, und es andere Luftteilchen gäbe, die vielleicht zerbrechlicher als die andern wären, und die Dichte/Beschaffenheit/Dicke der Saite nicht überall gleich wäre, geschähe es, dass ihre Globuli in zwei, drei, vier etc. Teile zerbrächen. Diejenigen, die in zwei zerbrechen, stellen für die Ohren die Oktave dar, welche in der gleichen Zeit die doppelte Punktierung erhalten; diese wird aber vom Geist nicht wahrgenommen, weil unbedeutend wie sie ist, ist sie dem Einklang so ähnlich, dass sie für denselben gehalten wird. Aber welche in drei Teile weggehen, wodurch sie mehr Unähnlichkeit haben, erscheinen dem Geist deutlicher. Diejenigen, die in vier Teile brechen, erleiden dasselbe wie diejenigen welche in zwei [brechen]; diejenigen aber welche in fünf Teile zerschnitten werden, werden auch ziemlich deutlich wahrgenommen, aber, wie wegen ihrer Ähnlichkeit die Duodezim für die Quinte, so wird die Septdezim für die Terz gehalten, wovon es kommt, dass alle gut verfertigten Glocken, den Zusammenklang *ut mi sol* widerzugeben scheinen. Da aber die Quinte, die die Duodezim ist, ob in bestimmten Instrumenten (wie dies von dir bei den Saiten vorgeschlagen wurde) oder speziell bei den Glocken allein gehört wird, geschieht dies nicht so oft [dass alle drei Töne gehört werden dm], da

ejus fecerim, valde miror) melius fortasse et libentiùs accipientu [...] [Beeckman 1604-1634/IV, Brief an Mersenne, 214-215: 30. 5. 1633]

mehr Kügelchen in drei als in fünf Teile zerbrochen werden, aber auch weil alle die, welche in sechs Teile zerbrochen werden, eine Nondezim (welche eine Quinte ist) darstellen. [...]

Die Brief weist Beeckmann als Verfechter einer Teilchentheorie der Schallübertragung aus: Der tönende Körper zerlegt die umgebende Luft im Takt seines periodischen Erzitterns in kleine, wegfliegende Kügelchen, die das Ohr einem steten Kugelregen unterwerfen. Im Idealfall sind die Kügelchen alle gleich gross. Wegen ihrer Inhomogenität schwingt die Saite nicht auf allen ihren Teilen gleichmässig. Deshalb wird ein Teil der „Norm-Kügelchen“, die der Grundtonhöhe entsprechen, je nachdem in 2, 3, 4, ... kleinere Kügelchen zerhackt, und diese kleineren Kügelchen, entsprechen im Gehör der Oktave, Duodezim, Quintdezim, Septdezim etc.

Die Kügelchen haben also eine Vorliebe dafür, bei Teilung in gleich grosse Teile zu zerfallen. Die Kugelgestalt stellt sich offenbar automatisch wie bei der Teilung eines Regentropfens wieder ein. Im Vergleich zur modernen Quantentheorie wird hier genau umgekehrt gedacht, denn die Quantisierung, beruht auf ganzzahliger Teilung des Gegebenen und nicht auf ganzzahligen Vielfachen eines festen Elementarquants.

Beeckman weist den verschiedenen simultan gehörten Frequenzen verschiedene Informationsträger zu, nämlich die verschieden grossen Kügelchen, die auf verschiedenen Luftwegen übertragen werden. Die Strukturierung der weggeschleuderten Luft in verschiedenartige Kügelchen am Ort der Schallquelle stellt eine Art physikalische Schallanalyse dar, die es dem menschlichen Gehör ermöglicht, die verschiedenen Töne gleichzeitig zu erkennen.

Für die Kodierung der Tonhöhe gibt es in diesem Modell mehrere Möglichkeiten: Sie kann nämlich sowohl in der Grösse oder Masse der Kügelchen als auch im Impulsrhythmus, in dem die Teilchen auf das Trommelfell einschlagen, stattfinden. Das Erkennen der Tonhöhen erfolgt im Gehör durch Registrierung ihrer Grösse, ihrer Auftrefffrequenz oder aus beidem zusammen.

Allerdings ist die Deutung der Impulsfrequenz für die Obertöne nicht unproblematisch, denn die Zerteilung der Luft geschieht ja zu wohldefinierten Zeitpunkten. Und diese entsprechen der Grundfrequenz. Wie werden im Falle des dritten Teiltons aus einem einzigen erzeugenden Impuls drei sukzessive zeitlich gleichabständige?

Naheliegender scheint die Kodierung der Tonhöhe durch die Grösse oder Masse der Kügelchen. Es ist denkbar, dass die verschieden grossen Kügelchen verschiedene Stellen im Gehör affizieren. Da Radius und Volumen einer Kugel einem kubischen Zusammenhang folgen (doppelter Radius entspricht achtfachem Volumen bzw. achtfacher Masse) sind die Frequenzverhältnisse bei der Kugelteilung invariant in den Massen- nicht aber in den Kugelradienverhältnissen abgebildet.

Die ausschliessliche Kodierung der Frequenzen in der Kugelmasse hinwiederum verträgt sich schlecht mit Beeckmans Koinzidenztheorie der Konsonanz. Diese beruht nämlich darauf, dass sich bei ganzzahligem Frequenzverhältnis auf einander abgestimmte periodische Impulsmuster ergeben, und solche können nur entstehen, wenn die Teiltonkügelchen ebenfalls in einer periodischen Abfolge auf das Gehör treffen.

Beeckman bezieht den Mechanismus der Schallrezeption nicht in die Diskussion der Partialtöne mit ein. Bei ihm findet die Frequenzanalyse schon in der Luft und nicht erst im Gehör statt. Insofern deckt sich sein Ansatz mit demjenigen von de Mairan/Rameau, den auch Rousseau im Artikel *SON* des *Dictionnaire de Musique* beschreibt. [vgl. Kap. [3.1.3](#), [3.1.4](#)]

Bekanntlich können auch in der modernen Physik nicht alle Eigenschaften des Lichtes aus seiner Wellennatur erklärt werden. Gewisse Effekte können nur unter Zuhilfenahme von Elementarteilchen, den Photonen, gedeutet werden, andere hingegen verschliessen sich der Deutung mit Photonen. Es ist, wenn man Schall und Licht unter einer übergreifenden Theorie verstehen möchte, nahe liegend, akustische Elementarteilchen, sogenannte Phononen, zu postulieren. Die Unschärferelation Frequenz/Zeit lässt sich jedenfalls ohrenfällig mit einfachsten Mitteln demonstrieren [vgl. Kap. [8.4.2](#)].

Die Atomisten betrachten Licht und Schall aus einem einheitlichen Blickwinkel. Beide Erscheinungen sind auf Partikel zurückzuführen, die sich von der Schall- oder Lichtquelle zum Rezipienten bewegen.

Beeckmans Korpuskeltheorie der Schallausbreitung gibt möglicherweise eine Erklärung dafür ab, weshalb er sich bei der Erklärung seiner Konsonanztheorie nicht an der realen stetig verstandenen Bewegung der Saite orientiert. Das Zerschneiden der Luft in Partikel findet jedesmal, wenn die Punkte der Saite maximale Transversalgeschwindigkeit haben – zum Zeitpunkt ihres Nulldurchgangs – statt, und dies geschieht während einer vollen Periode zweimal. Die weggeschleuderten Teilchen, die das Hörorgan treffen, sind als diskrete Ereignisse einem Nadelimpuls vergleichbar. Die Theorie Beeckmans bezieht sich nicht auf die schwingende Saite, sondern auf den Ort, wo die Schallpartikel auf das Hörorgan auftreffen. Sie ist eigentlich eine Theorie der Wahrnehmung und nicht eine Theorie der Saitenschwingung.

Eulers Konsonanztheorie [Euler, 1739] ist von ähnlichen Vorstellungen geleitet, und auch dort werden Konsonanzen mit parallelen periodischen Punktmustern, analog zu den periodischen Nervenimpulsmustern bei Hesse [1973] [vgl. Muzzolini 1991, 164-166; Muzzolini 1994], veranschaulicht.

Die Bemerkung zum Tongemisch in einem Glockenklang wirft, auch wenn sie nicht korrekt beobachtet ist, die Frage auf, ob es denn den Glocken unmöglich ist, nur einen einzigen Ton zu erzeugen. Da von allen guten Glocken die Rede ist, muss angenommen werden, dass es für Beeckman klar ist, dass dies unmöglich ist, und dass die optimale Lösung für den Glockenklang – angesichts dieser zwangsläufigen Frequenzvielfalt – darin besteht, einen Durdreiklang zu modellieren. Der ideale Glockenklang nach Beeckman enthält also im Unterschied zu Mersenne keine inharmonischen Teiltöne.

Dass in einer Obertöne produzierenden Saite nicht alle Punkte gleichartig schwingen, ist möglich, allerdings sind die zweifellos vorhandenen Inhomogenitäten der Saiten aus der Zeit wohl eher Anlass für Interferenzerscheinungen, die sich in einer Frequenzunschärfe (Schwebungen, Fluktuation in der Tonhöhe) äussern. Auch die ideale (unendlich dünne, homogene) gezupfte Saite produziert Partialtöne, die sich aus der Gestalt ihrer dreiecksförmigen und nicht sinusförmigen Anfangsauslenkung zum Zeitpunkt des Loslassens ergeben. Dass die Obertöne nicht sichtbar sind, stellt bis ins 19. Jahrhundert eine grosse Schwierigkeit dar [vgl. Brandt: Kap. [5.1](#); König: Kap. [6.4](#)]

2.4.3. Descartes

Descartes' Besprechung der Konsonanzen im *Compendium musicae* baut auf der klassischen Saitenteilung am Monochord, die rationalen Zahlenverhältnisse als solche werden in seinem System axiomatisch vorausgesetzt und bedürfen demnach keiner weiteren Rechtfertigung. Allerdings können die Widersprüche zum zeitgenössischen Konsonanzempfinden in Zarlinos Senario nicht aufgelöst werden, wenn der Oktave keine Sonderrolle zukommt. Descartes bedient sich dabei auch wahrnehmungspsychologischer Argumente, die sich nicht auf die Prinzipien seiner *Prænotanda* [vgl. Kap. [1.1.4](#)] reduzieren lassen.

De Consonantiis.

Advertendus est primo unisonum non esse consonantiam, quia in illo nulla est differentia sonorum in acuto & gravi, sed illa se habere ad consonantias ut unitas ad numeros. Secundo ex duobus terminis, qui in consonantia requiruntur, illum, qui gravior est, longe esse potentiorum, atque alium quodammodo in se continere: ut patet in nervis testudinis, ex quibus dum aliquis pulatur, qui illo 8^a. vel quinta acutiores sunt, sponte tremunt & resonant, graviore autem non ita, saltem apparenter: cujus ratio sic demonstratur. Sonus se habet ad Sonum ut nervus ad nervum, atqui in quolibet nervo omnes illo minores continentur, non autem longiores, ergo etiam in quolibet sono omnes acutiores continentur, non autem contra graviore in acuto, unde patet acutiorem terminum esse inveniendum per divisionem gravioris: quam divisionem debere esse Arithmeticam, hoc est in æqualia, sequitur ex prænotatis. [Descartes 1619/1650, 11-12; 1978, 8/9; 1990, 53]

Über die Konsonanzen.

Zuerst ist zu bemerken, daß der Einklang keine Konsonanz ist, weil bei ihm kein Unterschied in den Tönen bezüglich Höhe und Tiefe besteht, sondern er verhält sich zu den Konsonanzen wie die Eins zu den Zahlen. | Zweitens: von zwei Grenztönen, die man bei einer Konsonanz annimmt, ist der tiefere bei weitem der stärkere und enthält den anderen gewissermaßen in sich. Wie man bei den Saiten einer Laute sehen kann, erklingen, wenn sie angerissen werden, diejenigen, welche eine Oktave oder Quint höher sind, von selbst mit, die tieferen aber nicht; so zeigt es sich wenigstens. Der Grund dafür ist, daß sich der Ton zum Ton wie die Saite zur Saite verhält. Und wie in einer Saite alle kürzeren, nicht aber längeren Saiten enthalten sind, so enthält auch ein Ton alle höheren aber nicht umgekehrt ein hoher die tieferen Töne. Daraus folgt, daß man den höheren Ton durch Teilung des tieferen findet. Diese Teilung muß eine arithmetische sein, d.h. zu gleichen Teilen, wie aus den Vornotizen hervorgeht. [vgl. Kap. [1.1.4](#)]

Der Einklang ist keine Konsonanz, da zwischen den beiden Töne kein Tonhöhenunterschied besteht [vgl. Punkt 1 aus *Prænotanda* IV]. Die Überlegung ist vergleichbar mit der Frage, ob man einen Punkt als Grenzfall einer Strecke ansehen dürfe. Sie wirft die Frage nach der Identität des Tones auf. Da Unisonotöne in der Regel von verschiedenen Instrumenten hervorgebracht werden, wäre es aus Sicht von Praetorius' *profunditatis*-Dimension unproblematisch, den Einklang als Konsonanz zu bezeichnen. In Descartes' Deutung degeneriert der Einklang zum „Punkt“. Das Zusammengehen zweier Stimmen ergibt einen einzigen Ton.

Der tiefere Ton einer Konsonanz ist dominanter, und er enthält den anderen in einer gewissen Weise: Die um eine Oktave oder Quinte höher gestimmten Saiten einer Laute erzittern spontan mit, die tieferen hingegen nicht.

„ergo etiam in quolibet sono omnes acutiores continentur, non autem contra graviore in acuto“: Es ist damit nicht gemeint, dass ein Ton alle seine Obertöne physikalisch mit enthalte. Durch arithmetische Teilung der Saite lassen sich aber die musikalischen Intervalle erzeugen, insbesondere auch die konsonanten Intervalle innerhalb der Oktave. Durch Saitenteilung können aber keine tieferen Töne erhalten werden.

De Octava.

Von der Oktave

Hanc primam esse consonantiarum omnium, & quæ facillime post unisonum auditu percipitur, patet ex dictis, atque etiam in fistulis experimento comprobatur, quæ si validiori flatu inspirentur quam solent, statim una octava acutiorem edent sonum, neque ratio est quare immediate ad octavam deveniat potius, quam ad quintam vel alias, nisi quia octava omnium prima est, & quæ omnium minime differt ab unisono; unde prætera | sequi existimo nullum sonum audiri, quin hujus octava acutior auribus quodammodo videatur resonare, unde factum est etiam in testudine, ut crassioribus nervis, qui graviore edunt sonos, alii minores adjungerentur una octava acutiores, qui semper una tanguntur & efficiunt, ut graviore distinctius audiantur: ex quibus patet nullum sonum qui cum octavæ termino consonabit, posse cum alio ejusdem octavæ dissonare. [Descartes 1619/1650, 14; 1978, 12:14/13:15; 1990, 55]

Die Oktave ist die erste aller Konsonanzen und wird nach dem Einklang am leichtesten aufgenommen; daß geht aus dem Gesagten hervor. Auch ein Versuch mit der Flöte bestätigt, daß, wenn sie kräftiger als gewöhnlich angeblasen wird, sogleich die höhere Oktave erklingt. Der Grund warum man eher in die Oktave gelangt als in die Quinte oder ein anderes Intervall, ist der, daß die Oktave von allen Konsonanzen die erste ist und von allen am wenigsten vom Einklang absticht. Ausserdem folgt daraus, wie mir scheint, daß kein Ton gehört wird, dessen höhere Oktave nicht irgendwie dem Ohr mitzuklingen scheint. Daher kommt es auch, daß man bei der Laute zu den stärkeren Saiten, von denen die tiefen Töne ausgehen, andere, dünnere, um eine Oktave höhere hinzufügt, die, immer zusammen angeschlagen, bewirken, daß man die tieferen Töne deutlicher hört. Woraus folgt, daß kein Ton, der mit dem einen Ton einer Oktave konsoniert, mit dem anderen derselben dissoniert. [13/15]

Ein "künstlich" hinzugefügter erster Oberton bewirkt eine deutlichere Wahrnehmung der Grundtonhöhe.

Geschieht dies

- aufgrund der Zweifelt? Tonhöhenerkennung ist frequenzabhängig, macht sich die Tonhöhe am oberen Ton manifest und wird die Tonhöhe folglich indirekt bestimmt?
- oder aufgrund der veränderten Klangfarbe? Die Klangsynthese bei der Laute verstärkt die Intensität des ohnehin schon vorhandenen ersten Obertons und bewirkt eine Klangfarbe (Schwingungsform), bei der die Tonhöhe leichter erkennbar ist.
- wegen des erzeugten Differenztons, der mit dem Grundton in der Frequenz übereinstimmt?

Aus Beeckmans Koinzidenztheorie folgt jedenfalls, dass das Impulsmuster der simultanen Oktave die gleiche Periodizität wie ihr tieferer Ton hat.

Descartes' Interesse gilt bei diesen Bemerkungen, in denen der Ton als potenzielle Vielheit begriffen wird, nicht primär dem physikalisch/psychologischen Mechanismus der Tonhöhenerkennung. Es geht ihm vielmehr um die Begründung der Sonderstellung der Oktave unter den Konsonanzen: Oktaverweiterungen konsonanter Intervalle sind wiederum konsonant, ebenso Oktavergänzungen. Denn bei einer Quinte ist die Quarte schon zwischen dem höheren Ton und der mitgehörten Oktave des tieferen als "Schatten" vorhanden :

[...] unde fit ut illa quasi umbra quintæ, quæ illam perpetuo comitetur, possit appellari [...]
[Descartes 1619/1650, 24]

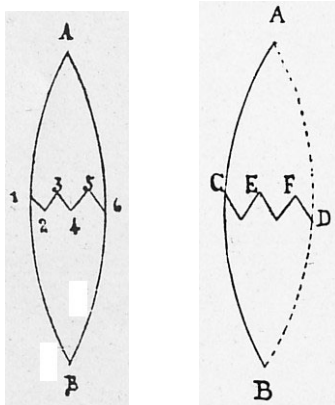
[...] woraus folgt, daß man sie gleichermassen als Schatten der Quinte, der sie dauernd begleitet, bezeichnen kann. [25]

Aus diesem Oktavergänzungsprinzip kann denn auch die Konsonanz der kleinen Sexte abgeleitet werden, was mit Zarlinos *senario* wegen ihres Verhältnisse 5 : 8 nicht möglich war. Die Frage nach der satztechnischen Rolle der Quarte könnte dann so beantwortet werden: Ohne Licht kein Schatten; sie darf nicht isoliert im Bass auftreten.

Auf Anfrage Mersennes nimmt Descartes in zwei Briefen aus dem Jahr 1633 Stellung zu den Obertönen.

Pour ce que vous mandez des deux sons qui s'entendent quelquefois d'une mesme corde, ie l'ay bien autresfois aussi remarqué; & ie pense que la raison est que, les cordes estant vn peu fausses & inégales, il se fait en elles deux sortes de treblemens en mesme temps, l'un desquels, à sçauoir celuy qui fait le son le plus graue, & qui est le principal, depend de la longueur & grosseur & tension de toute la corde; & l'autre, qui fait un son plus aigu, depend de l'inégalité de ses parties. Pensez, par exemple, lorsqu'on touche la corde AB, qu'elle va en chacun de ses tours & retours depuis 1 iusques à 6, ou depuis 6 iusques à 1, pour faire son principal son & celuy qui luy est naturel, mais que cependant l'inégalité de ses parties cause aussi en elle vn autre treblement, qui fait qu'étant paruenue depuis 1 iusques à 2, elle retourne vers 3, puis de là vers 4, & de 4 vers 5 & enfin vers 6, ce qui engendre vn son plus aigu que le precedent d'une douzième. Tout de mesme si ce second treblement est seulement double du premier, il fera l'octaue; si quadruple, la quinzième; & s'il est quintuple, il fera la dix-septiesme maieure. [Descartes, Brief an Mersenne, 22. 7. 1633, A.T. I, 267-268]

Was Sie mir schreiben über die zwei Töne, die sich manchmal von der gleichen Saite hören lassen, habe ich gelegentlich auch schon bemerkt. Ich denke, der Grund ist, dass sich in den Saiten, die ein wenig falsch und ungleich sind, zwei Arten von Schwingungen in der gleichen Zeit bilden. Die eine von ihnen, nämlich diejenige die den tieferen Ton, welcher der hauptsächliche ist, bewirkt, hängt von der Länge, der Dicke und Spannung der ganzen Saite ab. Die andere, die eine höheren Ton bewirkt, hängt von der Ungleichmässigkeit ihrer Teile ab. Denken Sie beispielsweise, dass während man die Saite AB anschlägt, so dass sie in jedem Hin und Her, von 1 nach 6 oder von 6 nach 1 geht, um ihren Hauptton zu machen, der ihr natürlicher Ton ist, bewirkt die Ungleichheit ihrer Teile in ihr zugleich noch eine andere Schwingung, die macht, dass sie, nachdem sie von 1 nach 2 gelangt ist, zu 3 zurückkehrt, dann nach 4 und von 4 zu 5 und schliesslich zu 6, was einen Ton erzeugt, der eine Duodezim über dem andern liegt. Ebenso, wenn diese zweite Zittern nur das Doppelte des ersten ist, bewirkt es die Oktave, wenn das Vierfache die doppelte Oktave; und wenn es das Fünffache ist, bewirkt es die grosse Septdezim.



In den beiden Briefen aus dem Jahr 1633 an Mersenne zur Obertonfrage illustriert Descartes mit zwei fast identischen Zeichnungen die Möglichkeit verschiedener gleichzeitiger Teiltöne als Überlagerung zweier Schwingungen in verschiedenen Raumrichtungen. Die Zickzacklinien beschreiben dabei die Bewegungsspur des Saitenmittelpunkts ähnlich einem Funktionsgraphen.

Der Oberton entsteht also dadurch, dass gleichzeitig Schwingungen in zwei verschiedenen Raumrichtungen, transversal und longitudinal zur Saite, stattfinden. Auf gleiche Weise könnte unter der Annahme, dass die Saite nicht in einer Ebene schwingt, eine dritte Partialschwingung erklärt werden. Eine Begründung, weshalb die Frequenzen mit derjenigen der Grundschwingungen korreliert sind, gibt Descartes nicht. In der zweiten Briefstelle [s.u.] scheint er anzunehmen, dass sich die ganzzahligen Vielfachen nicht zwangsläufig einzustellen brauchen.

Die Zeichnung passt nicht zur Duodezim, sondern zur Septdezim. Es ist anzunehmen, dass Descartes fälschlicherweise eine Halbschwingung der Grundfrequenz mit vollen Schwingungen des Obertons vergleicht. Diese Vermutung wird durch die Beschriftung und Beschreibung der korrespondierenden Stelle im zweiten Brief gestützt; er spricht dort von „trois autres petits retours C E, E F, F D“ [A.T., 272]. Bemerkenswert an der zeichnerischen Veranschaulichung, ist ihre Prozesshaftigkeit. Während die Endlagen der Saite überlagerte Momentaufnahmen im Abstand einer halben Periode sind, wird der Oberton anhand der Bewegungskurve eines Punktes der Saite, als Funktion der Zeit dargestellt. Sie ist also Vorläufer der Darstellung einer Schwingung als Funktionsgraph.

Pour ce qui est de dire si les cordes qui font cela sont fausses ou non, ie pense vous auoir desia mandé qu'elles sont moins fausses que celles qui pourroient auoir vn resonnement plus dissonant, mais qu'elles ne laissent pas de l'estre plus que celles qui n'ont qu'un seul son tout net & tout égal; & il peut y auoir de la fausseté dans les tuyaux & en tous les autres cors resonans, aussi bien que dans les cordes. Je suis ...[Descartes, Brief an Mersenne, Nov. 1633, A.T. I, 272]

Was dazu zu sagen ist, ob die Saiten die das machen, falsch sind oder nicht, glaube ich Ihnen schon geschrieben zu haben, dass sie weniger falsch sind als diejenigen, die einen noch dissonanteren Klang haben, aber zweifellos sind sie es mehr als diejenigen, die einen einzigen ganz sauberen und ganz gleichmässigen Ton haben. Ebenso wie in den Saiten kann diese Falschheit in den Pfeifen und in allen klingenden Körpern vorkommen.

Der Brief ist leider Fragment und bricht am Ende der zitierten Stelle ab. Saitentöne, die Obertöne miteinschliessen, entsprechen nicht der Idealvorstellung eines reinen Tons. Die betreffenden Saiten sind *falsch*. Noch schlimmer aber wäre, wenn die Obertöne in unharmonischem Verhältnis zum Hauptton ständen. Der Begriff *resonnement* steht für den Klangcharakter und wird ähnlich gebraucht wie *Resonanz* von Prætorius [vgl. Kap. 2.5.3]. In der Wortkombination mit *dissonant* wird er zur Empfindungskategorie, obschon er in einem technischen Sinn, nur die hörbare Reaktion des Körpers auf die Störung des Anschlages bedeutet. Descartes scheint hier ganz nahe daran zu sein, einen Zusammenhang zwischen Klangcharakter und Teiltonzusammensetzung herzustellen. Die Gleichsetzung von rein und unzusammengesetzt scheint aber eine unvoreingenommene Bewertung der durch Obertöne verursachten Klangeigentümlichkeiten zu verhindern. Descartes bewegt sich bei dieser physikalisch motivierten Beurteilung der Töne ausserhalb seiner Maxime im *Compendium musicæ*, das Angenehme mit einer mittleren Komplexität gleichzusetzen [Descartes 1619/1650, Prænotanda 7].

2.4.4. Mersenne

Die folgenden Stellen exponieren die Beobachtungen Mersennes zu den Obertönen bei Saiten.

Determiner pourquoy vne chorde touchée à vuide fait plusieurs sons en mesme temps.

Il semble qu'Aristote a cogneu cette experience, lors qu'il a fait la question pourquoy le son graue contient l'aigu dans le 8. Probleme de la 19. Section, pourquoy il deuient plus aigu en finissant, dans l'onzième: à quoy l'on peut rapporter le 12 & le 13. Probleme, & d'ou plusieurs autres Problemes de la mesme Section peuuent estre entendus, de sorte que cette Proposition est fort

Bestimmen, warum eine angeschlagene leere Saite mehrere Töne zur gleichen Zeit macht

Es scheint als ob Aristoteles diese Erfahrung gekannt hat, denn er fragt in Problem 8, Sektion 19, weshalb ein tiefer Ton den hohen enthalte, warum er beim Verklingen höher wird, im elften [Problem]: worauf man das 12. und 13. Problem beziehen kann, und von dem verschiedene andere Probleme der gleichen Sektion abhängen, sodass diese Proposition ziemlich nützlich ist für die

vtile pour la Philosophie d'Aristote. Mais il faut remarquer qu'il n'a pas sceu que la chorde frappée, & sonnée à vuide fait du moins cinq sons differens en mesme temps, dont le premier est le son naturel de la chorde, qui sert de fondement aux autres, & auquel on a seulement esgard pour le chant & pour les parties de la Musique, d'autant que les autres sont si foibles qu'il n'y a que les meilleures oreilles qui les entendent aysément. [Mersenne 1636/IV, 208]

Or ces sons suiuent la raison de ces nombres 1, 2, 3, 4, 5, car l'on entend quatre sons differens du naturel, dont le premier est à l'Octaue en haut, le second à la douziesme [...] Où il faut remarquer deux choses, à sçauoir que nul son ne s'entend iamais plus bas, ou plus graue que le son naturel de la chorde, car ils sont tous plus aigus; & que ces sons suiuent le mesme progrez des sauts de la trompette [...]. [Mersenne 1636/IV, 208]

Outre ces quatre sons extraordinaires, i'en entends encore vn cinquiesme plus aigu, que i'oy particulièrement vers la fin du son naturel, & d'autresfois vn peu apres le commencement: il fait la Vingtiesme maieure avec le son naturel, avec lequel il est comme trois à vingt. [Mersenne 1636/IV, 209]

Philosophie von Aristoteles. Aber man muss bemerken, dass er nicht gewusst hat, dass die angeschlagene, frei schwingende Saite mindestens fünf verschiedene Töne gleichzeitig hervorbringt, von denen der erste der natürliche Ton der Saite ist, der als Fundament für die andern dient und auf den man ausschliesslich achtet im Gesang und in den Stimmen der Musik, während die andern so schwach sind, dass nur die besten Ohren sie leicht hören können.

Diese Töne folgen dem Verhältnis der Zahlen 1, 2, 3, 4, 5, denn man hört vier vom natürlichen verschiedene Töne, von denen der erste die höhere Oktave, der zweite die Duodezime bildet [...] Es ist zweierlei zu bemerken, nämlich dass man nie einen tieferen Ton als den natürlichen der Saite hört, denn sie sind alle höher und dass sie der gleichen Anordnung folgen wie die Sprünge bei der Trompete [...].

Ausser diesen vier zusätzlichen Tönen nehme ich noch einen fünften noch höheren wahr, den ich besonders gegen Ende des natürlichen Tons höre und manchmal auch kurz nach dem Beginn: er bildet die grosse Vingtiesme (2 Oktaven + grosse Sexte) mit dem natürlichen Ton, mit welchem er sich wie 3 : 20 verhält.

Eine einzige Saite produziert mehrere gleichzeitige Töne. Das Phänomen ist nicht allgemein bekannt. Die Referenz auf Aristoteles ist inhaltlich nicht unproblematisch und wird von Mersenne wohl auch deshalb als Anknüpfungspunkt verwendet, um seine Belesenheit zu dokumentieren und um hervorzuheben, dass die zeitgenössische Erkenntnis hier über das antike Wissen hinausgeht. Mersenne bezeichnet sich selbst nicht als Entdecker der Obertöne. Von ihm geht aber die diesbezügliche Korrespondenz mit verschiedenen Gelehrten aus [Beeckman, Kap. 2.4.2; Descartes Kap. 2.4.3]. Die Teiltöne bilden in ihren Frequenzen bis zum fünften Teilton eine arithmetische Folge. Der erste ist der „natürliche“ Ton, und es ist nicht möglich, dass Töne entstehen, deren Frequenz unter diesem natürlichen Ton liegt. Darüberhinaus beobachtet Mersenne einen Teilton, der nicht ins Konzept passt: Als 3 : 20 handelt es sich um die grosse Sexte + zwei Oktaven. Der nahegelegene siebte Teilton 1 : 7 = 3 : 21 wird offenbar – als nicht im Tonsystem verankert – nicht in Erwägung gezogen. Oder beobachtet Mersenne gar einen inharmonischen Partialton? Die Inharmonizität der Saiten bewirkt eine Verschiebung der Partialtöne hin zu höheren Frequenzen. Es müsste sich also um den nach oben verschobenen sechsten Teilton (1 : 6 = 3 : 18) handeln. Dies ist, obschon Mersenne den sechsten Teilton nicht erwähnt, bei einer Abweichung von einem kleinen Ganzton (18 : 20 = 9 : 10) doch eher unwahrscheinlich. Neben der Bestimmung der Frequenzverhältnisse gibt Mersenne eine wahrnehmungspsychologische Begründung für die unterschiedliche Deutlichkeit der verschiedenen Teiltöne:

[...] les sons qui font la Douziesme & la Dixseptiesme maieure s'entendent pour l'ordinaire plus distinctement, parce qu'ils sont plus esloignez du son naturel de la chorde, avec lequel le son qui

[...] die Töne, die die Duodezime und die grosse Septdezime bilden, hört man gewöhnlich deutlicher, weil sie weiter vom natürlichen Ton der Saite entfernt sind, mit welchem der Ton der

fait l'Octave a vne si grande ressemblance, que
l'oreille les prend pour vn mesme son [...]
[Mersenne 1636/IV, 209]

die Oktave bildet eine so grosse Ähnlichkeit hat,
dass sie das Ohr für den gleichen Ton hält [...].

Die Oktavähnlichkeit wird in den von Mersenne weiter oben erwähnten Aristoteles-Problemata weitgehend analog charakterisiert.

Je mehr ein Ton von der Oktave oder einem Vielfachen der Oktave abweicht, desto eher kann er in einem Zweiklang bemerkt werden. Die Oktavähnlichkeit stellt einen Verschmelzungsfaktor dar. Dies könnte die obige Nichterwähnung des sechsten Teiltöns, die Replik der Duodezim, erklären.

Die Wahrnehmung der Teiltöne ist aber auch eine Funktion der Feinheit des Gehörs, der Musikalität und der momentanen Befindlichkeit:

[...] tous n'entendent pas les mesmes sons, parce
qu'ils n'ont pas l'oreille assez bonne, ou le
iugement assez subtil pour les discerner & pour
les remarquer, ou parce qu'ils n'y apportent pas
assez d'attention, ou qu'ils ne sont pas assez
destachez de la preoccupation [Mersenne 1636/IV,
209]

[...] nicht alle nehmen diese Töne wahr, weil sie
nicht ein genügend gutes Ohr haben oder weil sie
sie als zu fein erachten, um sie zu unterscheiden
und zu bemerken, oder weil sie ihnen nicht
genügend Aufmerksamkeit schenken oder weil sie
nicht unvoreingenommen sind.

Das Moment der Aufmerksamkeitslenkung wird später unter anderem von Rameau und Helmholtz oder wie folgt von Handschin wieder aufgegriffen:

Dass die Klangfarbenempfindung bei Richtung der Aufmerksamkeit auf die Partialtöne verloren gehen kann, gibt auch der Klangfarbe einen Grenzstatus „zwischen Sein und Nichtsein“. [Handschin 1948, 384]

Darüber hinaus dürfte die Lenkung der Aufmerksamkeit auf die Partialtöne auch dem gehörmässigen Erfassen polyphoner Strukturen abträglich sein.

Bezüglich der physikalischen Erklärung des Teiltonphänomens ist sich Mersenne unschlüssig, und er gibt einen ganzen Katalog von Erklärungsmöglichkeiten, die teilweise aus der Korrespondenz mit andern Gelehrten stammen.

C'est pourquoy il faut examiner comme il se peut
faire que la mesme chorde batte l'air differement
en mesme temps, car puis qu'elle fait les cinq ou
six sons dont i'ay parlé, il semble qu'il est
entierement necessaire qu'elle batte l'air 5, 4, 3 &
2 fois en mesme temps qu'elle le bat vne seule
fois, ce qui est impossible de s'imaginer, si ce n'est
que l'on die que la moitié de la chorde le bat deux
fois tandis que la chorde entiere le bat vne fois, &
qu'en mesme temps la 3, 4 & 5 partie le battent 3,
4 & 5 fois, ce qui est contre l'experience, qui
montre euidemment que toutes les parties de la
chorde font vn nombre esgal de retours en mesme
temps, car toute la chorde estant continuë n'a
qu'un seul mouuement, quoy que ces parties se
meuent d'autant plus lentement qu'elles sont plus
proches des cheualets. [Mersenne 1636/IV, 209-
210]

Man muss deshalb untersuchen, wie es möglich
ist, dass die gleiche Saite die Luft gleichzeitig auf
verschiedene Weise schlägt, weil sie diese fünf
oder sechs Töne, von denen ich gesprochen habe,
hervorbringt, scheint es absolut notwendig, dass
sie die Luft 5, 4, 3 und 2mal schlägt in der
gleichen Zeit, wie sie sie einmal schlägt, was
unmöglich ist sich vorzustellen, wenn es nicht so
ist, dass sie die Hälfte der Saite zweimal schlägt,
während dem sie die ganze Saite einmal schlägt,
und dass zur gleichen Zeit der dritte, vierte und
fünfte Teil sie drei, vier und fünfmal schlagen,
was gegen die Erfahrung ist, die klar zeigt, dass
alle Teile der Saite eine gleiche Anzahl von
Schwingungen in der gleichen Zeit vollbringen,
weil die ganze Saite zusammenhängend ist und
nur eine Bewegung hat, auch wenn sich die Teile
umso langsamer bewegen je näher sie beim Steg
sind.

In der Tat bildet die gezupfte freischwingende Saite zu jedem Zeitpunkt mit der Nulllage einen konvexen Bereich. Es bilden sich folglich keine Schwingungsknoten wie bei den Flageoletttönen, und die Obertöne können nicht in der Gestalt der Saite direkt gesehen werden, denn alle Punkte der gezupften Saite durchqueren die Nulllage simultan. Dies stellt, wie bereits erwähnt, bis ins 19. Jahrhundert, teilweise sogar nach der Verbreitung der Fourieranalysis, eine Schwierigkeit [z.B. Koenig, Kap. 6.4] für die Deutung des Obertonphänomens dar. Deshalb verwirft Mersenne seinen richtigen Erklärungsansatz.

Or puis que chaque son est déterminé quant au graue, ou à l'aigu par le nombre de battemens de l'air, & que la chorde ne le peut battre qu'un certain nombre de fois dans un mesme temps, il est nécessaire que l'air ayant esté battu se reflechisse sur la chorde, & qu'en faisant son retour elle luy donne un nouveau mouvement; ce que l'on peut concevoir en deux manieres, car l'on peut dire que l'air a une plus grande tension, c'est à dire qu'il est tellement disposé, que quand il est frappé il va plus viste, & a ses retours plus frequens que la chorde [...] ou bien l'on peut dire que l'air ayant esté frappé & enuoyé, par exemple, à costé droit de la chorde revient apres qu'elle s'en va à main gauche, de sorte qu'elle le trouve en chemin, & qu'elle le repousse pour la seconde fois en luy adjoignant un nouveau mouvement, afin qu'il face désormais l'Octave en haut avec le mouvement, ou le son naturel de la chorde, qui garde toujours un mesme temps pour un mesme nombre de retours, tandis que l'air fait deux retours contre un [...]. [Mersenne 1636/IV, 210]

Da ein Ton in seiner Tiefe oder Höhe durch die Zahl der Luftschläge bestimmt ist und weil die Saite sie in einer gegebenen Zeit nur eine bestimmte Anzahl mal schlagen kann, ist es notwendig, dass die geschlagene Luft sich auf der Saite reflektiert und, während sie [die Saite] zurückkehrt, gibt sie ihr [der Luft] eine neue Bewegung; Die kann man sich auf zwei Arten vorstellen, denn man kann sagen, dass die Luft eine grössere Spannung hat, das heisst, dass sie so disponiert ist, dass sie, wenn sie geschlagen wird, schneller geht und mehr Rückläufe macht als die Saite [...] oder man kann auch sagen, dass nachdem die Luft geschlagen und beispielsweise auf die rechte Seite der Saite getrieben worden ist, sie umkehrt, nachdem sie [die Saite] sich nach links bewegt, derart dass sie sie [die Luft] auf ihrem Weg antrifft und, dass sie sie ein zweites Mal wegstösst, indem sie ihr eine erneute Bewegung zuführt, so dass sie die höhere Oktave zur Bewegung, das heisst zum natürlichen Ton, der Saite macht, welche immer die gleiche Zeit für eine gegebene Zahl von Schwingungen benötigt, während die Luft zwei Schwingungen gegen eine macht [...].

Da nur eine uniforme Bewegung beobachtet werden kann und daraus „folgt“, dass die verschiedenen Töne nicht schon in der Saite entstehen, erwägt er die Möglichkeit, dass die Luft während einer Saitenschwingung gleichzeitig mehrere Moden ausbildet. Die Obertöne bilden sich nach dieser Auffassung erst in der Luft. Sie wären damit die Folge einer nicht-linearen Übertragung zwischen Schallquelle und Übertragungsmedium, vergleichbar mit den subjektiven Obertönen zwischen Trommelfell und Schnecke.

Dies ist die Zusammenfassung von Beeckmans Brief an Mersenne [vgl. Kap. 2.4.2]:

[...] si l'on admet les atomes de Democrite, l'on peut dire que les differentes parties de la chorde qui frappent l'air differement, diuisent & rompent la Sphere de l'air en 2, 3, 4 & 5 parties, ou que la mesme partie de la chorde le rompt differement selon ses differentes dispositions; de sorte que l'une des parties de l'air se rompt en deux, l'autre en trois, quatre ou cinq parties, &c. [Mersenne 1636/IV, 210]

[...] wenn man die Atome von Demokrit zulässt, kann man sagen, dass die verschiedenen Teile der Saite, welche die Luft auf verschiedene Weise schlagen, die Sphäre der Luft in 2, 3, 4 und 5 Teile zerteilen und brechen, oder dass der gleiche Teil der Saite sie verschieden bricht, entsprechend ihren verschiedenen Dispositionen, derart dass einer der Luftteile sich in zwei, der andere in drei, vier und fünf Teile usw. zerlegt.

Die folgende Erklärung wirkt auf den ersten Blick paradox:

Or si l'on suppose que la chorde entiere contienne tous les sons qui peuuent estre faits par sa diuision, il faut dire qu'elle fait seulement paroistre ceux qui viennent de la premiere, seconde, ou troisieme bissection [...]. [Mersenne 1636/IV, 210]

Wenn man annimmt, dass die ganze Saite alle Töne enthält, die durch ihre Unterteilung hervorgebracht werden können, muss man sagen, dass es nur den Anschein macht, als ob sie von der ersten zweiten oder dritten Unterteilung kommen [...].

Die einheitliche Saitenbewegung enthält bereits alle Töne. Deshalb sind keine Knoten zu beobachten. Sie sind durch die Superposition verschwunden ...

Eine weitere Möglichkeit basiert auf einem Schalenmodell der Saite:

Quelques-vns ont recours aux differentes surfaces de la chorde pour expliquer tous ces sons, & disent que le milieu fait vn son different de celuy que fait la surface exterieure, mais il n'y a nulle apparence de croire que la chorde soit diuisée en plusieurs cylindres concaues, qui couurent le cylindre conuexe du milieu, comme les peaux d'oignon se couurent les vnes les autres. Et bien que la chorde fust tissuë de ces differens cylindres, elle ne pourroit faire des sons differens, si elle ne frappoit l'air 1, 2, 3, 4, & 5 fois en mesme temps: ce qui n'est pas plus aysé à expliquer par la multitude de ces cylindres [...]. [Mersenne 1636/IV, 211]

Einige führen verschiedene Schichten der Saite an, um alle diese Töne zu erklären, und sagen, dass die Mitte einen von der äusseren Oberfläche verschiedenen Ton macht. Aber es gibt keinen zwingenden Grund zu glauben, dass die Saite in mehrere Hohlylinder zerlegt ist, die den innersten Vollzylinder umgeben, wie die Zwiebelschalen, die einander überdecken. Auch wenn die Saite aus diesen Zylindern bestünde, könnte sie nur dann verschieden Töne machen, wenn sie die Luft gleichzeitig 1, 2, 3, 4 und 5 mal schlug, was mit dieser Vielzahl von Zylindern nicht leichter zu erklären ist [...].

Die Möglichkeit der Inhomogenität der Saite könnte an Beeckman [vgl. Kap. [2.4.2](#)] angelehnt sein. Von verschiedenen Schichten der Saite ist dort aber nicht die Rede.

Seine Zusammengesetztheit stellt keine Bedrohung für die Identität des Tones dar, im Gegenteil:

[...] le son de chaque chorde est d'autant plus harmonieux & agreable, qu'elle fait entendre vn plus grand nombre de sons differens en mesme temps [...] [Mersenne 1636/IV, 211 (Corollaire I)]

[...] der Ton einer Saite ist umso harmonischer und angenehmer, je mehr verschiedene Töne sie gleichzeitig hören lässt [...]

Es besteht also ein direkter Zusammenhang zwischen Teilton-Zusammensetzung und Klangqualität! Die Feststellung gibt Anlass zu einer moralisierenden Betrachtung:

Car l'on peut comparer tous ces motifs à tous les sons qui accompagnent le mouuement de la chorde, & dire & quant que l'intention qui est la plus fortes, & qui a la fin principale & la plus excellente, est semblable au son dominant & naturel de la chorde, puis qu'il est le plus sensible, & la cause de tous les autres sons qui se font par des mouuements plus pecipitez, ou par des retours plus frequens [Mersenne 1636/IV, 211 (Corollaire I)]

Denn man kann alle diese Motive mit allen diesen Tönen, die die Bewegung der Saite begleiten, vergleichen und bezüglich derjenigen Absicht, die die stärkste ist und die den Hauptzweck ausmacht und die ausgezeichnetste ist, sagen, dass sie dem dominierenden und natürlichen Ton der Saite ähnlich ist, denn er ist der deutlichste und die Ursache aller andern Töne, die aus schnelleren Bewegungen oder durch häufigere Rückläufe entstehen.

Der Grundton der Saite wird zur moralisch guten Handlung und die harmonischen Teiltöne sind die damit harmonisierenden Handlungsmotive. Der Grundton ist die Ursache der Obertöne wie später bei Rameau.

2.4.5. Poisson

Ein Eintreten auf Poissons Erläuterungen [1668] zu Descartes' *Compendium musicæ* als selbständiges Dokument lohnte sich nicht nur wegen der langen Publikationsgeschichte des Descarteschen Compendiums – zwischen seiner Niederschrift 1618 und dem Erstdruck 1651 sind die Schriften Mersennes erschienen. Die Themen, die Poisson behandelt, weisen zudem nur einen losen Zusammenhang zu Descartes auf. Sie sind vielmehr physikalische Reflexionen zur Natur des Schalls. Sie reflektieren mit allen Ungereimtheiten den Kenntnisstand der „Akustik“ um die Jahrhundertmitte. Die Erwartung, dass Mersennes Erkenntnisse zum Phänomen der Obertöne in irgend einer Form Eingang in Poissons Schrift gefunden hätte, erfüllt sich nicht. Poissons Gedanken zu Anschlagstelle und Klangqualität bei Saiten können dennoch in den gleichen Zusammenhang von Vielheit in der Einheit gestellt werden. Der Einfluss der Anschlagstelle auf die Klangqualität der gezupften Saite wird hier meines Wissens zum ersten Mal Gegenstand einer physikalischen Betrachtung.

[...] la raison pour laquelle on entend un son plus harmonieux, tiré au milieu, qu'au extrémité est la suivante: si l'on pose le doigt en E, le segment AE est plus tendu que le segment EB; mais comme nous l'avons montré, plus la corde est tendue, plus les vibrations sont nombreuses, par conséquent le segment de corde AE fait ses allers et retours un peu plus vite qu'RB, et ainsi ils se font mutuellement entrave et composent un son ni aigu ni grave mais grave-aigu. Lorsqu'au contraire toute la corde est pincée en F, les segments AF, FB et l'ensemble de AB dans son mouvement, s'accordent d'autant que l'on a plus exactement pincé le milieu de la corde. [Poisson 1668, 102]

[...] der Grund, weshalb man einen harmonischeren Ton hört, wenn sie [die Saite] in der Mitte gezogen wird statt an den Enden, ist der folgende: wenn man den Finger bei E ansetzt, ist das Stück AE mehr gespannt als das Stück EB; aber wie wir gezeigt haben, sind die Vibrationen umso zahlreicher je stärker die Saite gespannt ist, folglich macht das Saitenstück AE sein Hin- und Hergehen ein wenig schneller als EB, und so behindern sie sich gegenseitig und bilden einen Ton, der weder hoch noch tief ist sondern tief-hoch. Wenn andererseits die ganze Saite in F gezupft wird, stimmen die Stücke AF, FB und das Ganze AB in seiner Bewegung umso mehr überein, je genauer man in der Mitte gezupft hat.

Der Fall, den Poisson hier diskutiert, ist derjenige, bei dem die Auslenkung der Saite nicht vernachlässigbar klein ist im Verhältnis zur Saitenlänge. In den Untersuchungen des 18. Jahrhunderts wird gewöhnlich explizit verlangt, dass die Auslenkung der Saite klein im Verhältnis zu ihrer Länge ist (Taylor, Euler, Bernoulli). Poisson nimmt die beiden Teilstücke als in ihren Bewegungen von einander unabhängig an und kommt so – unter Vernachlässigung der Kontinuitätsbedingung – zu zwei gleichzeitig erklingenden gegeneinander verstimmtten Tönen. Dabei stellt für ihn die Entfernung der Zupfstelle von der Saitenmitte ein Mass für die Harmonizität der erzeugten Töne, d.h. für ihre unterschiedliche Klangqualität, dar. Ein Ton braucht also keine eindeutige Tonhöhe zu haben. Die Überlagerung zweier gegeneinander leicht verstimmtter Töne führt zu Schwebungen, oder in der Terminologie von Diderot zu Abweichungen von der Isochronizität. Jedenfalls meint „grave-aigu“ nicht eine Zusammensetzung aus mehreren harmonischen Teiltönen. Die Bezeichnung „grave-aigu“ scheint den stillschweigenden Gegensatz von *hoch* und *tief* aufzubrechen. In wörtlicher Übersetzung stellt *schwer* und *spitz* natürlich kein Gegensatz dar.

Poissons Überlegung basieren auf der beobachteten Klangveränderung bei Verschiebung der Anschlagsstelle. Aus der Obertonperspektive lässt sich seine Beobachtung wie folgt erklären: In der Mitte gezupft werden die Oktave und alle andern Partialtöne gerader Ordnung unterdrückt. Der Ton hat dann eine minimale Zahl von Obertönen. Hörbare Schwebungen und Klangverschmierung im Grundtonbereich sind im Allgemeinen auf Inhomogenitäten zurückzuführen. Schwebungen zwischen Partialtönen höherer Ordnung sind auch ohne Inhomogenität möglich, und dies in der Regel um so eher, je peripherer die Anschlagstelle ist und je besser die Resonanzeigenschaften im betreffenden Frequenzbereich sind.

Die Kenntnis der Obertöne und ihrer Tonhöhen hätten Poissons Überlegungen eine andere Richtung geben können. Seiner Auffassung gemäss hängt die Variation der doppelten oder unbestimmten Tonhöhe stetig von der Verschiebung der Anschlagstelle ab. Die Obertöne sind aber diskret auf feste Tonhöhen verteilt. Eine Berechnung der Fourierkoeffizienten in Abhängigkeit der Anschlagstelle findet sich bei Brandt [1855] [vgl. Kap. [5.1](#) und Anhang [A]].

Poissons Ansatz stellt den Versuch einer eindimensionalen Klassifikation der gezupften Saitentöne dar: Die Bewegung der Saite ist dabei umso *uniformer* und wirkt umso *harmonischer*, je näher sie in der Mitte gezupft wird. Das Klangideal Poissons ist durch die Gleichung „einfach = harmonisch“ demjenigen Mersennes entgegengesetzt.

2.5. Resonanz

Das Paradigma der Resonanz ist in seiner vielfältigen Anwendung auf alle Elemente der Schallübertragungskette äusserst fruchtbar. Wer die hier beschriebenen Ansätze des 17. Jahrhunderts überblickt und versucht sie zu einer geschlossenen Theorie des Klangs zu integrieren, wird feststellen, dass sich eine solche kaum von derjenigen von Helmholtz, wie sie sich in den 50-er Jahren des 19. Jahrhunderts herauskristallisiert, unterscheiden wird. Weshalb wagte niemand diese Synthese?

Die zusammengesetzte Natur der Instrumentaltöne wird von Mersenne hinlänglich bekannt gemacht. Das sympathische Mitschwingen gleichgestimmter Saiten und anderer Instrumente ist dem 17. Jahrhundert nichts Neues. In Ansätzen schimmert bei Descartes und Mersenne der Nutzen wechselseitig unterschiedlicher Sympathie bei der Feststellung von Gemeinsamkeiten im Zusammenklang durch.

Die Zusammengesetztheit der Töne der Singstimme wird von Mersenne und später unabhängig davon von Dodard festgestellt und dieser erklärt dies durch Verteilung der in den Stimmlippen erzeugten Schwingung auf örtlich verschiedene Resonanzbereiche.

Und bei Praetorius sind *Resonanz* und *Qualität* äquivalente Eigenschaften des Tons. Die Formanttheorie der Klangqualität liegt also in der Luft. Zusammen mit der Deutung der Cochlea als Resonanzsystem bei Du Verney ist auch die dazu symmetrische Ortstheorie der Frequenzverarbeitung bereits ausgesprochen.

2.5.1. Descartes : Resonanz und Sympathie

Id tantum videtur vocem humanam nobis
gratissimam reddere, quia omnium maxime
conformis est nostris spiritibus. Ita forte etiam

Dies wiederzugeben, scheint uns gerade die
menschliche Stimme am geeignetsten zu sein, weil
sie unserem Geiste am entsprechendsten ist. Daher

amicissimi gratior est quam inimici ex sympathia & dispathia affectuum, in eâdem ratione quâ ajunt ovis pellem tensam in tympano obmutescere si feriat, lupinâ in alio tympano resonante. [Descartes 1619/1650, 1978, 2]

kommt es vielleicht von der Sympathie oder Antipathie der Empfindungen, daß uns die Stimme eines Freundes angenehmer als die eines Feindes ist, wie wenn man in dieser Beziehung sagte, daß eine mit einem Schaffsfell bespannte Pauke verstummt, wenn man sie schlägt, eine andere mit einem Wolfsfell bespannte tönt. [3]

„Id“ bezieht sich auf den Zweck der Musik, Gemütsbewegungen hervorzubringen. Die Übersetzung von J. Brockt von „resonante“ mit „tönt“ fängt das Moment des Antwortens, Zurückklingens nur unvollkommen ein. Die Stelle weist Resonanzerscheinungen als längst bekannt und im Volksmund verankert aus.

2.5.2. Mersenne : Echo und Verfahren des Spektralvergleichs

Or il faut remarquer le terme, dont on use pour exprimer cette qualité des corps, qui leur fait multiplier la premiere percussion de l'air iusques à la rendre capable de toucher les sens de l'ouye, à sçavoir *resonants*, comme qui les diroit encore vne fois sonants, car cette diction exprime le son qui vient à nostre oreille, lequel n'est pas le premier Son, mais l'écho multiplié depuis le premier air qui touche la corde iusques à celui qui touche l'oreille; [Mersenne 1636/I, 2-3]

Man beachte den Ausdruck *resonants*, den man gebraucht um diese Eigenschaft der Körper auszudrücken, die sie dazu bringt, das erste Schlagen der Luft derart zu vielfältigen, dass es ihm ermöglicht die Hörorgane zu berühren, als ob man sagen würde noch einmal klingend. Denn diese Redeweise drückt aus, dass der Ton, der in unser Ohr kommt, nicht der erste sondern das vielfältigte Echo ist, von der ersten Luft, welche die Saite berührt bis zu derjenigen, die das Gehör trifft.

Resonanz ist eine Eigenschaft des klingenden Körpers. Resonanz ist multipliziertes Echo, Wiederhall. Die klangverstärkende Wirkung des Resonanzkörpers bei Saiteninstrumenten beruht gemäss heutiger Auffassung hauptsächlich auf der Übertragung der durch die Saitenschwingung ausgelösten Vibration des Steges auf das Deckbrett und nicht auf direkter Echowirkung über den Luftweg.

L'on trouuera tousiours de nouuelles proprietiez des chordes, si on prend la peine de les examiner en toutes les façonspossibles: or il est constant qu'elles font plusieurs sons differens, ou vn mesme son composé de plusieurs en mesme temps & que l'on oyt seulement ceux qui s'accordent ensemble [...] mais il n'est pas certain que chaque corde face tous les sons possibles en mesme temps; & si elle les fait, on ne sçait pas pourquoy l'on entend quasi que lesdits Consonances. L'experience enseigne aussi que de deux chordes de mesme grosseur & matiere, soit de leton ou de boyau, &c. qui sont à l'vnisson, l'une estant touchée fait quelquefois trémblér l'autre plus fort, qu'elle ne tremble au son de l'autre: par exemple, quand on a touché la corde A B, la corde C D tremble bien fort, & quand on touché CD, la corde A B ne tremble quasi quasi point ce que l'on remarquera aysément sur vn Monochorde

Man wird immer weitere neue Eigenschaften der Saiten finden, wenn man sich die Mühe nimmt, sie auf alle möglichen Weisen zu untersuchen: So ist es gewiss, dass sie verschiedene Töne hervorbringen oder einen gleichen Ton, der aus mehreren gleichzeitigen zusammengesetzt ist, und dass man nur diejenigen hört, die gut zusammenpassen [...] aber es ist ungewiss, ob jede Saite alle möglichen Töne gleichzeitig hervorbringt; und falls sie dies tut, weiss man nicht, weshalb man nur die genannten Konsonanzen hört. Die Erfahrung lehrt auch, dass bei zwei Saiten, der gleichen Dicke und des gleichen Materials, sei es aus Messing oder aus Darm etc., die im Einklang stehen, manchmal, wenn die eine angeschlagen wird, sie die andere stärker zum zittern bringt, als sie selbst beim Ton der anderen zittert. Wenn man zum Beispiel, die Saite AB anschlägt, zittert die Saite CD ziemlich

monté de plusieurs chordes à l'unisson [...]
[Mersenne 1636/IV, 221-222]

stark und wenn man CD anschlägt zittert die Saite
AB kaum, was man leicht an einem Monochord
bemerkt, das mit mehreren Saiten im Einklang
bezogen ist [...]

Das Beobachten der gegenseitigen Resonanz erlaubt es, die verschiedene spektrale Zusammensetzung von Tönen gleicher Tonhöhe mit optischer Unterstützung zu erkunden. Falls sich die Töne gegenseitig nicht in gleichartige Mitschwingung versetzen, sind sie anders zusammengesetzt – und sie klingen anders. Wenn die zu vergleichenden Saiten über dem gleichen Resonanzkörper liegen, garantiert dies zwar Gleichheit fast aller äusseren Bedingungen, jedoch ist dadurch nicht gewährleistet, dass das Mitschwingen über den Luftweg allein erfolgt. Die unterschiedliche gegenseitige Resonanz kann an der unterschiedlichen Inharmonizität der Saiten, aber auch an einer verschiedener spektralen Zusammensetzung (zum Beispiel bei minimaler Variation der Anschlagsstelle) liegen. Mersenne selbst gibt keine Erklärung zu diesen Beobachtungen, sondern delegiert sie „aux excellens esprits“. Aus dem Kontext kann aber geschlossen werden, dass er den Nutzen der Resonanzerscheinungen für die Schallanalyse erkennt.

Der Resonanzbegriff wird bei Mersenne noch in einem anderen Zusammenhang bei der Bewertung der qualitativen Unterschiede des Lauten- und Violintons thematisiert [Mersenne 1636/I, 9-14]. Er unterscheidet nämlich bei der Laute zwischen *son de percussion* und *son de résonance*. Daraus ergibt sich eine Trennung in *Einschwingvorgang* und *stationäre Phase des Klingens* sowie auch in *auslösender Anschlag* und *Echo*. Der Perkussionston der Laute ist Mersennes Einschätzung zufolge angenehmer als ihr Resonanzton. Der Ton der gestrichenen Violine ist unter den Musikinstrumenten der angenehmste, weil in ihm der attraktive Perkussionstön perpetuiert wird. Die Violinsaite wird durch das Streichen immer wieder angezupft. Die Deutung der Schwingung der Violinsaite als Sägezahnschwingung bei Helmholtz fügt sich schön in diese Vorstellung ein.

2.5.3. Praetorius: Resonanz und Klangfarbe

Folgende aus ihrem Zusammenhang gerissene Passagen illustrieren Praetorius' vielfältigen Gebrauch des Wortes *Resonantz* :

gibt einen **Resonantz**/ gleich als wenns vier Trommeten wehren/und Clarien mit eingeblasen würde [5]
ein *lieblichern* und *anmütigern* **Resonantz** geben [16]
... ist am **Resonantz** fast den ... gleich [39]
an **Resonantz** nicht *tieffer* als [39]
denselbigen auch am **Resonantz** fast *gleich* doch viel *stiller*[41]
haben gleichwohl einen gar besonderen/ *lieblichen*/ *scharffen* und bald einer *Violn* **Resonantz** [128]
daß es hol/ und fast als ein *Hornklang* sich im **Resonantz** *Artet* [132]
noch eine besondere Art von **Laut** oder **Resonantz** und Namen [133]
auch hol/ und doch *sanffte*/ und am **Resonantz** den Querflöiten gar ehnlich **klingen** [133]
und also mehr als halb zuge decket seyn/ viel ein andern **Resonantz**/ als ... in sich haben [133]
an der *Proportz* und **Resonantz** als ein Horn *klingen* [133]
wol Viol da Gamba, weil sie solchem Instrument am **Resonantz** sehr *nachartet* ... intituliret .[134]
dem natürlichen *Querflöitenklang* am **Resonantz** noch *gleicher* ...[139]
dieweil sie/ als eitel Octaven *lautten*/ und im **Resonantz** *mit sich bringen*. [140]
Dieselbige aber weil die Corpora so klein/ haben gar einen flachen und plattwegfallenden **Klang** und **Resonantz**. [142]

dieweil die *tieffe* oder *höhe* des **Resonantz** nicht vom ... sondern von ... herrühret [143]
 wenn die Mundstücke lenglicht und schmal seyn/ so geben sie viel ein *lieblicheren Resonantz* [143]
 daß die weiter mensur nimmer nicht so *lieblich am Resonantz* seyn/ als die enge.[143]
 weil es dergestalt etwas mehr als sonsten *gedempffet* wird/ gibt es ... einen *pompenden/dumpichten/ und nicht schnarrenden Resonantz*. [143]
 weil dadurch das Loch am Mundstücke etwas erweitert wird/ der **Resonantz** etwas tieffer unter sich steigt [143]
 nach zu machen/ und *dessen Art* und **Resonantz** recht *zu treffen*/ sehr schwer fellet; [145]
 ohne daß die *außlassung des Resonantz* durch die Löcherlein geendert wird/ [147]
 solch ein Schnarrwerck nach einem andern Instrument, welches mit dem Munde geblasen wird/ recht schwebt der **Resonantz** und klang in den Pfeiffen/ und schlägt gleich ein Tremulant etliche Schläge [151]

eine solche *perfecta Harmonia* und **Resonantz** sich könne vernehmen und hören lassen [Bd. 3, 98]
 erhelt mit jhrem lieblichen **Resonantz** die **Harmony** der andern Stimmen [Bd. 3, 148]
 ein trefflich-prechtigen/ herrlichen **Resonantz** von sich geben [Bd. 3, 168]

Der Begriff der *Resonantz* bei Praetorius ist also sehr eng verwandt zur modernen deutschen Klangfarbe. Diese auf den ersten Blick merkwürdige Gleichsetzung erlaubt einen Rückschluss auf eine implizite Klangfarbentheorie. Die Durchsicht der Textstellen zeigt, dass der Begriff nicht nur für Klangfarbe sondern auch auf den Ambitus angewendet wird. Resonanz heisst Widerhall (Mersenne), Resonanz bedeutet aber auch sympathisches Mitschwingen (Descartes). Angesichts einer gespannten Saite, des Repräsentanten des Tones schlechthin, die aber beim Zupfen ohne Resonanzkörper kaum einen Ton von sich gibt (Mersenne), zeichnet sich die Rolle des Resonanzkörpers als Tongeber und Klangformer ab. Je nach Material und Formung dieses Verstärkers ergibt sich eine andere Rückstrahl- oder Resonanzcharakteristik. Dieses von der absoluten Frequenz abhängige unterschiedliche Hervortreten stiftet bei der wechselnden Verkürzung der Saite beim Spielen einen Zusammenhang zwischen den verschiedenen Tönen gleicher Anschlagsart. Die Resonanzcharakteristik hat aber auch ihren Ambitus, der Resonanzkörper wirkt als Bandpassfilter. Der Resonanzbegriff bei Praetorius beinhaltet, überspitzt formuliert, eine Formanttheorie der Klangfarbe. Die Verwendung des Begriffs der Resonanz im Sinne von Klangcharakteristik wird jedenfalls erst vor der stillschweigenden Deutung der Instrumentaltöne als Tongemische plausibel.

2.5.4. Wallis: Resonanz und Schwingungsknoten

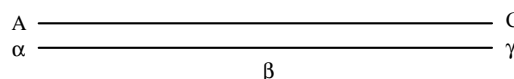
Dr. Wallis's Letter to the Publisher, concerning a new Musical Discovery'; written from Oxford, March 14. 1676/7. Philosophical Transactions, The Royal Society of London, Vol. 12 1677, Johnson Reprint Corporation, Kraus Reprint Corporation, New York 1963, 840-842

John Wallis berichtet in den *Transactions* der *Royal Society* von der Beobachtung der Schwingungsknoten bei einer Saite, wenn diese von einer andern Saite mit einem höheren Grundton und einfachem Frequenzverhältnis, in Resonanz versetzt wird. In der Folgezeit wird verschiedentlich, ohne Inhaltsangaben und ohne genaue Quellenangabe, bemerkt, dass nicht Sauveur, sondern Wallis, die Schwingungsknoten und Bäuche entdeckt habe, so zum Beispiel auch von Rousseau. Der Brief von Wallis an den Herausgeber wird hier integral wiedergegeben und übersetzt.

SIR,
 I Have thought sit to give you notice of a
 discovery that hath been made here, (about three

SIR,
 Ich halte es für angebracht, Sie über eine
 Entdeckung, die hier (vor etwa drei Jahren)

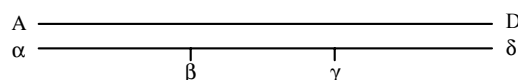
years since, or more) which I suppose may not be unacceptable to those of the *Royal Society*, who are Musical and Mathematical. 'Tis this; whereas it hath been long since observed, that, if a Viol string, or Lute string, be touched with the Bow or Hand, another string on the same or another Instrument not far from it, (if an *Unison* to it, | or an *Octave*, or the like) will at the same time tremble of its own accord. The cause of it, (having been formerly discussed by divers,) I do not now inquire into. But add this to the former Observation; that, not the whole of that other string doth thus tremble, but several parts severally, according as they are Unisons to the whole, or the parts of that string which is so struck. For instance, supposing AC to be an upper octave to $\alpha\gamma$, and therefore an Unison to each half of it, stopped at β :



Now if, while $\alpha\gamma$ is open, AC be struck; the two halves of this other, that is, $\alpha\beta$ and $\beta\gamma$, will both tremble; but not the middle point at β . Which will easily be observed, if a little bit of paper be lightly wrapped about the string $\alpha\gamma$, and removed successively from one end of the string to the other. In like manner, if AD be an upper Twelfth to $\alpha\delta$, and consequently an

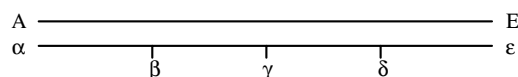
gemacht wurde, zu informieren, welche, wie ich denke, für diejenigen der *Royal Society*, die Musiker und Mathematiker sind, nicht unannehmbar sein dürfte. Es ist folgendes: Schon vor langer Zeit wurde beobachtet, dass eine Geigen- oder Lautensaite, wenn sie mit dem Bogen gestrichen oder von Hand angeschlagen wird, eine andere Saite auf dem gleichen oder auf einem anderen nicht weit entfernten Instrument (wenn sie im Einklang, der Oktave oder ähnlichem [Intervall] steht) zur gleichen Zeit von selbst erzittert. Den Grund dafür (der bereits verschiedenerseits erörtert wurde), werde ich hier nicht untersuchen. Aber ich möchte zur früheren Beobachtung hinzufügen; dass nicht diese andere Saite als Ganze erzittert, sondern mehrere Teile einzeln, je nachdem sie Einklänge zur ganzen oder zu Teilen jener so angeschlagenen Saite bilden. Angenommen AC sei die höhere Oktave zu $\alpha\gamma$ und also Einklang zu jeder Hälfte von ihr, festgehalten bei β :

Wenn nun $\alpha\gamma$ offen ist und AC angeschlagen wird, dann werden die zwei Hälften dieser anderen, nämlich $\alpha\beta$ und $\beta\gamma$, beide zittern, nicht aber der Mittelpunkt β . Was einfach beobachtet werden kann, wenn ein wenig Papier leicht um die Saite $\alpha\gamma$ gewickelt wird und schrittweise vom einen Ende der Saite zum anderen bewegt wird. In gleicher Weise, wenn AD die obere Duodezim zu $\alpha\delta$ ist und folglich einen



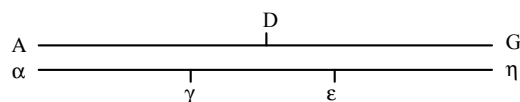
Unison to its three parts equally divided in β , γ . Now if, $\alpha\delta$ being open, AD be struck, its three parts, $\alpha\beta$, $\beta\gamma$, $\gamma\delta$ will severally tremble, but not the points, β , γ ; which may be observed in like manner as the former. In like manner, if AE be a double Octave

Einklang zu ihren drei gleichmässig in β und γ geteilten Abschnitten bildet. Wenn nun bei offener [Saite] $\alpha\delta$, AD angeschlagen wird, so werden ihre drei Teile, $\alpha\beta$, $\beta\gamma$, $\gamma\delta$ je einzeln zittern, nicht aber die Punkte β , γ ; was auf gleiche Weise wie vorher beobachtet werden kann. Ebenso, wenn AE die doppelte Oktave



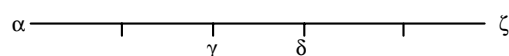
to $\alpha\epsilon$; the for quarters of *this* will tremble, when *that* is struck, but not the points, β , γ , δ . So if AG be a Fifth to $\alpha\eta$; and

von $\alpha\epsilon$ ist; dann werden die vier Viertel dieser erzittern, wenn jene angeschlagen wird, nicht aber die Punkte β , γ , δ . Wenn AG eine Quint zu $\alpha\eta$ ist und



consequently each half of *that* stopped in D, an Unison to each third part of *this* stopped in $\gamma\epsilon$; while *that* is struck, each part of *this* will tremble severally, but not the points γ, ϵ ; and while *this* is struck, each of *that* will tremble; but not the point D. The like will hold in lesser concords; but the less remarkably as the number of divisions increases.

This was first of all, (that I know of) discovered by Mr. *William Noble*, a Master of Arts of *Merton-Colledge*; and by him | shewed to some of our Musicians about three years since; and after him by Mr. *Thomas Pigot*, a Batchelour of Arts, and Fellow of *Wadham-Colledge*, who, giving notice of it to some others, found, that (unknown to him) the same had been formerly taken notice of Mr. *Noble*, and (upon notice from him) by others: and it is now commonly known to our Musicians here. I add this further, (which I took notice of upon occasion of making trial of the other,) that the same string, as $\alpha\gamma$, being struck in the midst at β , (each part being unison to the other,) will give no clear Sound at all; but very confused. And not only so (which others also have observed, that a string doth not sound clear if struck in the midst;) but also, if $\alpha\delta$ be struck at β or γ , where one part is an Octave to the other; and in like manner, if $\alpha\epsilon$ be struck at β or δ ; the one part being a double Octave to the other. And so if $\alpha\zeta$ be struck in γ or δ ;



the one part being a Fifth to the other, and so in other like consonant divisions: But still the less remarkable as the number of divisions increaseth. This and the former I judge to depend upon one and the same cause; viz. the contemporary vibrations of the several Unison parts, which make the one tremble at the motion of the other: But when struck at the respective points of divisions, the sound is incongruous, by reason that the point is disturbed which should be at rest.

Postscript.

A Lute-string or Viol-string will thus answer, not

folglich jede Hälfte von *jener*, festgehalten in D, einen Einklang zu jedem dritten Teil von *dieser*, festgehalten in γ und ϵ , bildet; wenn dann *jene* angeschlagen wird, so wird jeder Teil von *dieser* erzittern, nicht aber die Punkte γ, ϵ ; und wenn *diese* angeschlagen wird, so wird jeder Teil von *jener* erzittern, nicht aber der Punkt D. Das Gleiche gilt für schwächere Konsonanzen, aber weniger deutlich, wenn die Zahl der Unterteilungen zunimmt.

Dies wurde meines Wissens zuerst von William Noble, Master of Arts des Merton-Colleges, entdeckt und von ihm vor etwa drei Jahren einigen unserer Musiker vorgeführt, und nach ihm von Thomas Pigot, Bachelor of Arts und Schüler des Wadham-Colleges, der dies einigen anderen mitteilte, und dabei feststellte, dass (ihm unbekannt) das Gleiche schon früher von Noble und (gemäss seiner Mitteilung) von andern bemerkt worden war, und es ist unseren Musikern hier nun allgemein bekannt. Ich ergänze hier das Folgende (das ich bemerkte, als ich das Andere ausprobierte), dass die gleiche Saite $\alpha\gamma$, die in der Mitte β angeschlagen wird, wenn jeder Teil im Einklang zum andern steht) überhaupt keinen klaren Ton gibt, sondern einen sehr wirren. Und nicht nur dies (was auch andere beobachtet haben, dass eine in der Mitte angeschlagene Saite nicht deutlich klingt), sondern auch, wenn $\alpha\delta$ in β oder γ angeschlagen wird, wobei ein Teil die Oktave des andern ist, und ebenso, wenn $\alpha\epsilon$ in β oder δ angeschlagen wird, wobei ein Teil die doppelte Oktave des andern ist. Genauso, wenn $\alpha\zeta$ in γ oder δ angeschlagen wird,

wobei ein Teil eine Quinte des andern ist, und in anderen derartigen konsonanten Unterteilungen: aber immer weniger deutlich je mehr die Zahl der Unterteilungen zunimmt. Dies und auch das Vorangehende scheint mir auf die gleiche Ursache zu haben, nämlich die gleichzeitigen Vibrationen der einzelnen Teile, welche den einen in der Bewegung des anderen erzittern lassen: Wenn sie aber an den betreffenden Unterteilungspunkten angeschlagen werden, ist der Ton unvereinbar, weil der Punkt gestört ist, der ruhen sollte.

PS.

Eine Lauten- oder Violsaite wird deshalb nicht

only to a consonant string on the same or a neighbouring Lute or Viol; but to a consonant Note in Wind-Instruments: which was particularly tried on a Viol, answering to the consonant Notes in a Chamber-Organ, very remarkably: But not so remarkably, to the Wirestrings of an Harpsichord. Which, whether it were because of the different texture in Metal-strings from that of Gut-strings; or (which I rather think) because the Metal-strings, though they give to the Air as smart a stroak, yet not so diffusive as the other; I list not to dispute. But Wind-Instruments give to the Air as communicative a concussion, if not more, than that of Gut-strings. And we feel the Wainscot-seats, on which we sit or lean, to tremble constantly at certain Notes on the Organ or other | Wind-Instruments; as well as at the same Notes on a Base-Viol. I have heard also (but cannot aver it) of a thin, fine Venice-glass, cracked with the strong and lasting sound of a Trompet or Cornet (near it) sounding an Unison or a Consonant note to that of the Tone or Ting of the glass. And I do not judge the thing very unlikely, though I have not had the opportunity of making the Trial. [Wallis 1676/77, 840-842]

nur auf eine konsonante Saite auf der gleichen oder benachbarten Laute oder Viole antworten, sondern auch auf eine konsonante Note in Blasinstrumenten: dies wurde insbesondere im Versuch mit einer Viole, die auf eine konsonante Note einer Zimmerorgel antwortete, sehr merkbar, weniger ausgeprägt auf den gewickelten Drahtsaiten eines Harpsichords. Ob dies an der verschiedenen Textur in Metall- und Darmsaiten oder (was ich eher glaube) daran liegt, dass die Metallsaiten, obschon sie der Luft einen harten Schlag versetzen, sich dieser dennoch nicht so verbreitet wie der andere, möchte ich hier nicht entscheiden. Aber Blasinstrumente geben der Luft eine ebenso wenn nicht sogar noch mitteilksamere Erschütterung als Darmsaiten. Und wir fühlen die Tüfelholzsitze, auf denen wir sitzen oder auf die wir aufstützen, konstant bei gewisse Noten der Orgel oder anderer Blasinstrumente mitzittern; ebenso wie bei denselben Tönen der Bassviolen. Ich habe auch von einem feinen venezianischen Glas gehört (kann es aber nicht beweisen), das beim starken und andauernden Ton einer (nahen) Trompete oder eines Cornetts im Einklang oder Konsonanz zum Ton oder Klingeln des Glases, geborsten sei. Ich halte diese Sache für nicht unwahrscheinlich, aber ich hatte keine Gelegenheit, den Versuch selbst zu machen.

Von ganz besonderem Interesse ist die Frage der Resonanz beim nicht multiplen Grundfrequenzverhältnis der Quinte. Bei der Quinte stimmt die dreifache Frequenz des tieferen mit der doppelten Frequenz des höheren Tons überein und es ist gemäss Wallis der beiden Grundtönen gemeinsame „Oberton“, der erklingt, wenn eine der beiden Saiten in Schwingung versetzt wird. Wallis spricht zwar nicht von Knoten und Bäuchen, weist aber unmissverständlich (da experimentell verifizierbar), darauf hin, dass die betreffenden Teilungspunkte der Saite in Ruhe sind, und die Saite abschnittsweise die betreffenden Aliquotentöne hervorbringt.

Es stellt sich somit in Zusammenhang mit dem Klangcharakter des Tons die Frage, ob Wallis annimmt, dass die in Resonanz versetzten Töne um mit Ohm [1843] zu sprechen, im Klang der Saite als „reelle Bestandteile“ vorhanden sind. Partiiell Aufschluss darüber gibt seine Beobachtung, dass sich die Qualität des Tons ändert, er wirr wird, wenn die Saite an ihren Teilungspunkten in Schwingung versetzt wird. Dann wird nämlich das Mitschwingen der betreffenden Aliquotentöne verhindert, weil der Teilungspunkt ruhen sollte, der sie hervorbringen könnte. Offenbar ist es notwendig dafür, dass der Ton klar und nicht wirr ist, dass das Mittönen der Aliquotentöne nicht im Vorherein verhindert wird. Insgesamt nimmt die Stärke der Resonanz mit der Ordnungszahl des Aliquotentons ab.

Ferner ist diesbezüglich auch das Postskriptum aufschlussreich, wo das Resonanzphänomen bei klingenden Körpern anderer Art angesprochen wird. Die Lautensaite und der Kirchenstuhl können dabei als Messgerät für die resonanzverursachende Wirkung dieser anderen Instrumentaltöne angesehen werden: Sie werden je nach Instrument anders in Mitschwingen versetzt, und dies liegt nicht allein an der Stärke des Tons. Ob dies an der Art der Schwingung im klingenden Körper oder an der Weise ihrer Übertragung an die Luft liegt, will Wallis nicht beurteilen, aber unausgesprochen nimmt er wohl an, dass die Art der

Schwingung in der Luft, wie sie vom messenden Instrument (als Stellvertreter des Gehörs) empfangen wird, Ursache der verschiedenen Reaktion ist.

2.5.5. Du Verney: Resonanztheorie des Hörens

Du Verney, *Traité de l'Organe de l'Ouïe contenant la Structure, les Usages & les Maladies de toutes les Parties de l'Oreille*, Paris 1683 [Verney 1683]

Das Gehör erfüllt die mechanischen Voraussetzungen für ein Resonanzsystem. Du Verney (1648–1730) verdankt seine Kenntnisse der Resonanzphänomene dem Physiker Edmé Mariotte (1620–1684), [vgl. Békésy und Rosenblith 1948, 740], auf den er sich explizit bezieht.

A l'égard du limaçon on ne peut pas douter qu'il ne fasse partie de l'organe immediat; sa composition en est une preuve convainquante; car premierement la lame spirale qui en fait la principale partie, est dure, seiche, mince & cassante, qui sont les conditions requises dans les corps pour estre capables | de frémissemens.

2.° Cette lame n'est point couchée au dedans du canal demi-ovale spiral, mais elle est tendue tenant d'un costé au noyau. et de l'autre à une peau tres delicate qui se joint à la surface de ce canal; si bien que cette situation de la lame spirale est tres-favorable à la disposition qu'elle doit avoir pour ester aisément ébranlée. [Verney 1683, 93-94]

Hinsichtlich der Schnecke ist nicht zu bezweifeln, dass sie Teil des unmittelbaren [Hör-]Organs ist; ihre Zusammensetzung ist ein überzeugender Beweis dafür; denn erstens ist die Schneckentrennwand, die ihren Hauptteil darstellt, hart, trocken, fein und spröde, was die notwendigen Voraussetzungen in einem Körper sind, dass er zum Erzittern fähig ist. Zweitens ist die Schneckentrennwand nicht im Innern des halbovalen, gewundenen Kanals eingelegt, sondern sie ist gespannt, und hält so gut am Kern auf der einen Seite und an einer sehr feinen Haut, die mit der Oberfläche des Kanals verbunden ist, auf der anderen; dass diese Lage der Schneckentrennwand die Disposition dazu, leicht erschüttert zu werden, begünstigt.

Ob mit „peau tres delicate“ die Basilarmembran oder Reissersche Membran gemeint ist, wird nicht ganz klar. Anscheinend ist Du Verney die Dreiteilung des Schneckengangs in Längsrichtung nicht bekannt. Er nimmt an, dass die Erschütterungen der Luft auf das runde Fenster und die mechanische Erregung über die Mittelohrknöchelchen auf das ovale Fenster übertragen werden. Die Cochlea ist gemäss Du Verney mit Luft (und nicht mit Flüssigkeit!) gefüllt. Sie überträgt ihre Erschütterung auf die Schneckentrennwand. Der Schall dringt also von zwei Seiten, über das ovale und über das runde Fenster, in die Cochlea und bewirkt dadurch eine lebhafte Erschütterung der Schneckentrennwand:

[...] & ainsi la lame spirale estant frappée des deux costé, ses tremblemens doivent estre plus vifs & plus forts. [[Du Verney 1683, 95]

Enfin cette lame n'est pas seulement capable de recevoir les tremblemens de l'air, mais sa structure doit faire penser qu'elle peut répondre à tous leurs caracteres differens; car estant plus large au commencement de sa premiere revolution qu'à l'extremité de la dernière, où elle finit comme en pointe; & ses autres parties diminuant proportionnellement de largeur, on peut dire que les parties les plus larges pouvant estre ébranlées sans

[...] und so müssen, wenn die Schneckentrennwand von beiden Seiten angeschlagen wird, ihre Erzitterungen lebhafter und stärker sein.

Die Schneckentrennwand ist nicht nur in der Lage die Schwingungen der Luft zu empfangen, sondern ihre Struktur lässt denken, dass sie auf alle ihre verschiedenen Eigenschaften antworten kann. Weil sie am Anfang ihrer ersten Umdrehung breiter ist als am Ende der letzten, wo sie wie im Punkt endet, und ihre andern Teile proportional an Breite abnehmen, kann man sagen, dass die grösseren Teile, die erschüttert werden können,

que les autres le soient, ne sont capables que de fremissemens plus lents qui répondent par consequent aux tons graves, & qu'au contraire ses parties les plus étroites estant frappées, leurs fremissemens sont plus vistes, & répondent par consequent aux tons aigus [...] de sorte qu'enfin selon les differens ébranlemens de la lame spirale, les esprit du nerf, qui se repand dans sa substance, reçoivent différentes impressions qui representent dans le cerveau les diverses apparences des tons.
[Verney 1683, 96–98]

ohne dass es die andern [auch] werden, nur zu den langsameren Erschütterungen fähig sind, welche folglich auf die tiefen Töne antworten, und dass im Gegenteil, wenn ihre schmalsten Teile [an-]geschlagen werden, ihre Erschütterungen schneller sind, und folglich auf die hohen Töne antworten [...] derart dass entsprechend den verschiedenen Erschütterungen der Schneckentrennwand, die Hörnerven, die sich in ihrer Substanz verteilen, verschiedene Eindrücke empfangen, die im Gehirn die verschiedenen Erscheinungen der Töne darstellen.

Die Schneckentrennwand wird gegen das apikale Ende hin tatsächlich immer schmaler, hingegen wird die Basilarmembran umgekehrt immer breiter. Da für Du Verney die Schneckentrennwand in Vibration versetzt wird und nicht die Basilarmembran, kommt er zu der verkehrten Lokalisation der Resonanzstellen für die hohen und tiefen Töne. Helmholtz [1863], der – wie De Mairan [1737] – die Basilarmembran mit einer Harfe vergleicht, kommt zur korrekten Zuordnung, obschon seine Vorstellung der erregten stehenden Schwingungen auch nicht korrekt ist.

Abgesehen von der falschen Zuordnung der Resonanzstellen und der angenommenen Luft in der Schnecke steht damit eine Ortstheorie der Frequenzverarbeitung bereits in einer Form, mit der die wesentlichen Aspekte der Klangverarbeitung eingefangen werden können.

Die zusammengesetzte Natur der Töne zusammen mit diesem frühen Beispiel für eine mechanisch/physiologische Theorie der Frequenzverarbeitung auf der Grundlage der Resonanzvorstellung und dem Gegenstück der Schallerzeugung durch die Stimme bei Dodard [s.u.] scheinen dem späten 17. Jahrhundert bereits alle Elemente der Klangtheorien des ausgehenden 19. Jahrhunderts zur Verfügung zu stehen. Eine allgemein akzeptierte Synthese der verstreuten Kenntnisse lässt aber auf sich warten.

2.5.6. Dodard: Singstimme und mehrfache Resonanz

Der umfangreiche Aufsatz von Dodard zur Entstehung der Töne der menschlichen Stimme nimmt durch seine strikte Trennung in verursachende Stimmlippenschwingungen und Überformung des Klanges durch die Raumgeometrie der aktuellen Mund- und Zungenstellung, wesentliche Aspekte einer modernen Klangfarbentheorie vorweg. Auch wenn er die Stimme als mit allen bekannten Musikinstrumenten unvergleichbar ansieht, leugnet er die Parallelen zu bestimmten Zungenpfeifentönen keineswegs. Die Töne selbst sind in ihrem Wesen zusammengesetzt, obschon sie an der Oberfläche als einfach erscheinen.

1. S'il est vrai, comme on n'en peut pas douter, que la glotte soit le principal organe formel de la voix, elle en est l'organe unique, | & le canal de l'âpre artere n'y peut avoir aucune part formelle.

2. Si l'âpre artere n'a pas à l'égard de la glotte l'usage du corps d'une flute à l'égard de sa languette, la bouche doit avoir à l'égard de la glotte l'usage du corps d'un autre instrument à vent d'une espece inconnue à la Musique.

1. Wenn es, woran man nicht zweifeln kann, wahr ist, dass die Glottis das hauptsächlich bildende Organ der Stimme ist, dann ist sie dafür das einzige, | und der [raue Arterienkanal??] kann dazu keinen bildenden Anteil leisten.

2. Wenn die [raue Arterie??] in Bezug auf die Glottis nicht die Funktion des Körpers einer Flöte in Bezug auf ihrer Zunge hat, dann muss der Mund in Bezug auf die Glottis die Funktion des Körpers eines Blasinstrument einer bisher in der Musik unbekannten Art übernehmen.

3. La bouche ni les narines n'ont nulle part à la production de la voix, mais contribuent beaucoup au son de la voix, c'est-à-dire à sa force et à son agrément.
 4. La bouche ne fait rien à la production des tons, mais il est évident qu'elle les favorise en s'y proportionnant.
 5. Les proportions de la concavité de la bouche avec les tons sont très probablement des proportions harmoniques. Ce ne sont pas les proportions harmoniques prochainement répondantes à chacun des tons de la voix, mais les proportions éloignées. [Dodard 1700, 349-350]

3. Der Mund und die Nasenlöcher haben keinen Anteil an der Erzeugung der Stimme, aber sie tragen viel zum Klang der Stimme bei, nämlich zu ihrer Stärke und zu ihrer Annehmlichkeit.
 4. Der Mund trägt nichts zur Bildung der Töne bei, aber es ist offensichtlich, dass er diese, indem er sich darauf abstimmt, begünstigt.
 5. Die Proportionen der Mundhöhle zu den Tönen sind sehr wahrscheinlich harmonische Proportionen. Es sind dies [aber] nicht die am einfachsten auf jeden Ton der Stimme ansprechenden harmonischen Proportionen, sondern die entfernten Proportionen.

Wir stellen dem eine moderne Erklärung Dickreiters zur Stimme gegenüber:

Schwingungsgenerator der menschlichen Stimme sind die Stimmlippen oder -bänder im Kehlkopf; ihre Schwingungen bestehen aus einer Aneinanderreihung kurzer Druckimpulse. Die Frequenz liegt beim Sprechen zwischen 90 und 350 Hz, sie kann beim Singen zwischen 65 und 1400 Hz liegen. [...] Die Stimmlippenschwingungen werden aber nicht so abgestrahlt, wie sie erzeugt werden. Die an den Kehlkopf mit seinen Stimmlippen angekoppelten Hohlräume (Mundhöhle, Nasenhöhle, Nasenrachenraum und Schlund) wirken als Resonatoren, die willentlich einstellbar sind. Durch Verstellen dieser Resonatoren werden zum Beispiel die verschiedenen Vokale aus immer denselben Stimmlippenschwingungen hervorgebracht. [Dickreiter 1994, 41-42]

Dodard erkennt in Punkt 1 zu Recht die Stimmlippenschwingungen als Schwingungsgeneratoren. Ihre Frequenz bestimmt die Tonhöhe eines gesungenen Tons. Mund und Nasenhöhle haben keinen Einfluss auf die Tonhöhe, sondern nur auf die Annehmlichkeit und die Lautstärke. Versteht man *agrément* in Punkt 3 etwas allgemeiner als Klangqualität, so ergibt sich zusammen mit Punkt 4, dass die Klangqualität durch die Mundstellung beeinflusst werden kann, nicht aber die Tonhöhe. In Punkt 5 wird vermutet, dass die Dimensionen der Mundhöhle mit den Schwingungslängen der Stimmlippentöne in harmonischem Verhältnis stehen. Sind unter harmonischen Proportionen multiple Proportionen gemeint, dann besagt dies, dass die jeweiligen Eigenfrequenzen der Mundhöhle ganzzahlige Vielfache der Stimmlippenfrequenz darstellen. Es handelt sich dann um entferntere Obertonfrequenzen. Interpretiert man hingegen harmonische Proportionen als rationale Verhältnisse und „proportions éloignées“ als komplexe Zahlenverhältnisse, erhält man nur, dass die Mundresonanzen in einem nicht einfachen Frequenzverhältnis zur Stimmlippenfrequenz stehen.

In einer Übersicht über die grundlegenden musikalisch-physikalischen Prinzipien wird die strikte Trennung zwischen Schallerzeugung und „klangveredelndem Resonanzsystem“ [Dickreiter 1994, 203] noch deutlicher herausgearbeitet:

[...] principes de Musique & de Physique les plus vulgaires.
 Les voici.
 1. La voix est un son.
 2. Tout son est l'effet d'un air battu violemment.
 3. La matiere de la voix est l'air continu dans les pœmons poussé de bas en haut, du dedans au-dehors.

[...] die allgemeinstbekannten Prinzipien der Musik und der Physik.
 Hier sind sie.
 1. Die Stimme ist ein Ton.
 2. Jeder Ton ist die Folge von heftig angeschlagener Luft.
 3. Der Stoff der Stimme ist die in den Lungen enthaltene Luft, die von unten nach oben, von innen nach aussen gestossen wird.

4. Le resonnement de quelque son que ce soit, & par consequent celui de la voix, suppose la voix déjà formée & n'est que la suite du son.

5. Les corps resonnans qui sont visibles, sont ceux qui étant frappés de l'air porteur du son, sont capables de réflexion & de ressort, & par conséquent de vibration.

6. Les corps sonnans & resonnans visibles, sonnent & resonnent suivant leur dimension en longueur.

7. C'est cette dimension qui leur donne le ton.

8. Les corps resonnans resonnent particulièrement selon l'égalité où les proportions harmoniques de leur dimension, c'est-à-dire de leur ton avec le son auquel ils répondent; | & ils y répondent plus & moins, selon le degré de cette proportion, depuis l'unisson & les proportions harmoniques les plus éloignées.

Tout cela se trouve vrai dans tous les Instrumens de Musique, mais plus sensiblement dans les Instrumens à vent que dans les autres. [Dodard 1700, 352-353]

4. Die Resonanz eines jeden Tons und folglich diejenige der Stimme, setzt die bereits gebildete Stimme voraus, und ist nichts anderes als die Folge des Tons.

5. Die nachklingenden Körper, die sichtbar sind, sind diejenigen, die, wenn sie von der Luft, dem Träger des Tons, angeschlagen werden, fähig zur Reflexion und elastischem Verhalten und folglich [auch] zur Schwingung, sind.

6. Die klingenden und nachklingenden sichtbaren Körper, klingen und wiederklingen entsprechend ihrer Längenausdehnung.

7. Diese Ausdehnung gibt ihnen ihre Tonhöhe.

8. Die nachklingenden Körper klingen, insbesondere bei Gleichheit oder harmonischen Proportionen ihrer Ausdehnung nach, das heisst mit demjenigen Ton, auf den sie antworten, und sie antworten mehr oder weniger entsprechend dem Grad dieser Proportion zwischen dem Einklang und den entferntesten harmonischen Proportionen.

Dies trifft für alle Musikinstrumente zu, aber deutlicher [wahrnehmbar] bei den Blasinstrumenten als bei den anderen.

In Punkt 8 wird die Stärke der Resonanz mit der Einfachheit der Frequenzverhältnisse in Verbindung gebracht. Resonanz ist bei Gleichheit von anregender und antwortenden Eigenfrequenz am stärksten. Da Dodard die Deutung periodischer Funktionen als Superposition von einfachen Sinusschwingungen nicht zur Verfügung steht, kann er die Stimmlippenschwingung nicht als zusammengesetzt ansehen und sich bezüglich Resonanz auch nicht auf den Fall der Gleichheit von anregenden und antwortenden einfachen Sinustönen zurückziehen. Resonanz findet ohne diese Reduktion zwischen Klängen mit rationalen Grundfrequenzverhältnis statt. Beobachtungen der Resonanz – beispielsweise zwischen Saiten – zeigen, dass sie bei Gleichheit der Grundfrequenzen am stärksten ist. Die obige Deutung mit multiplen Proportionen ist erst dann korrekt, wenn man berücksichtigt, dass der mitschwingende Ton bei einer nicht multiplen Proportion der erste gemeinsame Oberton und nicht der Grundton der mitschwingenden Saite ist.

Was bei Dodard – in seiner eigenen Deutung ohne Teiltonzerlegung der Zungenschwingung – nicht zum Ausdruck kommt und auch nicht kommen kann, ist die Abhängigkeit der möglichen Resonanzen von der Art der Generatorschwingung. Wäre die von der Zunge erzeugte Luftdruckschwankung sinusförmig und nicht eine Aneinanderreihung von Druckpulsen, so könnten die betreffenden Obertonfrequenzen zur Zungenschwingung im Mundraum nicht selektiv verstärkt werden.

Abgesehen davon ist Dodard einer modernen Formanttheorie der Stimme sehr nahe, was auch die folgende Textstelle zur Besonderheit der Resonanzphänomene bei der Stimme deutlich zeigt:

Et c'est ce qui donne lieu d'entrevoir, que toutes les différentes consistences des parties de la bouche, même de celles qui sont les plus délicates & les plus

Und dies gibt Anlass einzusehen, dass alle die verschiedenen Konsistenzen der Teile des Mundes, sogar diejenigen, die am feinsten und zärtlichsten sind, zur

[Marginalie:]
Cela fait voir qu'encore que la voix paroisse un son fort simple, elle est en effet un son fort

flouettes, contribuent au
resonnement chacune en leur
maniere & très differement, en
sorte qu'on peut dire que c'est de
cette espece d'assaisonnement de
plusieurs differens resonnemens,
que résulte tout l'agrément de la
voix de l'homme inimitable à tous
les Instrumens de Musique. Les
Organistes semblent vouloir imiter
cette industrie, car on ne tire
presque jamais pour un seul
Registre en jouant de l'orgue, n'y
ayant aucun jeu entre les 24 ou 25
jeux des grandes orgues, même
parmi les jeux du son le plus
agréable, que les Organistes
n'accompagnent exprès de
quelque autre, & dont l'agrément
n'augmente par le mélange d'un
ou plusieurs autres jeux. [Dodard
1700, 359]

Resonanz beitragen, jede auf ihre
Weise und sehr verschieden, so
dass man sagen kann, dass aus
dieser Art von Würze mit
mehreren verschiedenen
Resonanzen, die ganze
Annehmlichkeit der Stimme des
Menschen, die unnachahmbar für
alle Musikinstrumente ist,
herrührt. Die Organisten scheinen
diese Fertigkeit nachahmen zu
wollen, denn man zieht fast nie nur
ein einzelnes Register, wenn man
Orgel spielt, denn es gibt kein
Register unter den 24 oder 25
Registern einer grossen Orgel,
auch nicht unter den Registern mit
dem angenehmsten Klang, das die
Organisten nicht zusätzlich mit
irgendeinem anderen begleiten,
deren Annehmlichkeit durch die
Mischung mit einem oder
mehreren anderen Registern nicht
zunimmt.

composé.

—
Dies lässt erkennen,
dass die Stimme,
obschon sie [uns] als
ziemlich einfacher Ton
erscheint, in
Wirklichkeit ein
ziemlich stark
zusammengesetzter Ton
ist.

Der Stimmlippenton verursacht aufgrund der speziellen Geometrie in Mund- und Nasenraum mehrere simultane Resonanzen, die je nach Mund- und Zungenstellung und allfälliger Verstopfung der Nasenlöcher anders ausfallen. Das Zusammenwirken dieser Faktoren bestimmt die Annehmlichkeit und mithin die Klangfarbenvariabilität der menschlichen Stimme.

Der dem Gehör einfach erscheinende Ton der Singstimme ist in Wirklichkeit, das heisst als Folge der Art seines Zustandekommens, zusammengesetzt. Dieses Zusammenwirken von Einzeltönen ist durchaus mit dem Zusammenspiel verschiedener Gewürze bei der Zubereitung einer Sauce vergleichbar. Im Falle der Zubereitung von Orgeltönen mittels Mixturen braucht die Annehmlichkeit durch Hinzufügen weiterer Gewürze nicht zu wachsen. Der Vergleich mit den Orgelmixturen kann auch als leise Kritik an zeitgenössischer Registrierungspraxis gelesen werden, denn Dodard lässt offen, ob sich durch eine zu reichhaltige Klangmischung die Annehmlichkeit sogar vermindert.

Der mehrteilige schallerzeugende Vorgang der Singstimme lässt also die zusammengesetzte Natur ihrer Töne leichter erkennen, als die ohne Resonanzkörper gedachte ideale Saite. Nimmt man die Stimme und nicht das Monochord als Repräsentanten des Tons schlechthin, so ergibt sich unter der Voraussetzung eines allgemeinen Resonanzprinzips für rationale Periodizitätsverhältnisse, wie es Dodard formuliert und wie es im frühen 18. Jahrhundert üblich ist, die zusammengesetzte Natur des abgestrahlten Schalles in Form eines Tongemischs von selbst. Diese Zusammengesetztheit ist nämlich die Folge des Übertragungsvorgangs: Nicht nur identische Tonhöhen, das heisst gleiche Periodizitäten, sondern auch ganzzahlige Vielfache, das heisst Obertöne und sogar entferntere Proportionen werden durch den Schallgeber, die Stimmlippenschwingungen, in Resonanz versetzt, und je nach Beschaffenheit des Resonanzkörpers ergibt sich eine anders zusammengesetzte Vielheit von Tönen. Diese übertragungsbedingte Klangformung wird dabei aber nicht als selektive Verstärkung des in der Generatorschwingung bereits Vorhandenen angesehen. Die Vielheit

der Töne ist vielmehr die Antwort des Resonanzkörper oder der darin befindlichen Luft auf einen beliebigen periodischen Vorgang [vgl. Kap. 3.1.3, 3.1.4].

Die Generatorschwingung selbst als in ihrer Natur zusammengesetzt zu erkennen, ist aus dieser Sicht trotz der – aus unserer Sicht – einfacheren mathematisch-physikalischen Aufgabenstellung, die schwierigere Aufgabe, denn die Vielheit zu erkennen, bedingte Übereinstimmung über die Natur des Einfachen, doch davon ist nicht auszugehen.

Versuche, die Vokale der menschlichen Stimme durch Musikinstrumente zu imitieren, sind alt: Die *vox humana* der Orgel ist seit dem frühen 18. Jahrhundert nachweisbar. So wurde eine solche nicht später als 1707 in die Schweimb-John-Orgel der ehemaligen Klosterkirche St. Abdon und Sennen zu Salzgitter-Ringelheim eingebaut [vgl.

<http://www.wamsiedler.de/Die_Orgel/Schweimb-John-Orgel/schweimb-john-orgel.html> (Juli 03)].

Im Jahr 1799 ist von der Petersburger Akademie der Wissenschaften ein Preis für die Analyse der Vokale und für die Erfindung eines zugehörigen Syntheseapparats ausgesetzt worden, den Christian Gottlieb Kratzenstein (1723–1795) posthum gewonnen hat. Er hat seinen Apparat – er ist der Zungenpfeife der *vox humana* nachempfunden – bereits im Jahr 1773 gebaut. Die Vokale werden durch auswechselbare Resonanzkörper mit verschiedener Geometrie über der gleichen schwingenden Zunge imitiert [vgl. Ullmann 1996, 112]. Diese Zweiteilung des schallerzeugenden Vorgangs in Generatorschwingung und klangdifferenzierende Resonanz erlaubt es, die menschlichen Sprachlaute zu imitieren und die von Dodard postulierte Funktionsweise der menschlichen Stimme erhält weitere Evidenz durch das Gelingen der analogen Synthese.

Wolfgang Kempelen (1734-1804) hat ebenfalls eine Sprechmaschine erfunden, die sogar ganze Wörter und einfache Sätze ohne Konsonantenhäufungen hervorbringen konnte [Ullman 1996, 112-113] und die er 1791 in seinem Buch *Mechanismus der menschlichen Sprache nebst Beschreibung einer sprechenden Maschine* detailliert beschreibt. Es handelt sich um eine Art Realtime-Synthese-Instrument auf Phonembasis: jedes Phonem ist „Ton“ dieses Zwitters aus Musikinstrumenten und Lebewesen [vgl. Lichtenhahn 1983 a: Lebendigtote Dinger].

Die letzte der von Kempelen gebauten Maschinen erlaubte es sogar durch Veränderung der schwingenden Zungenlänge, das heisst der Generatorfrequenz, die Tonhöhe der Vokale zu modulieren. Sie ist erhalten, aber nicht mehr funktionsfähig. Dieses Vorgehen zur Erforschung der Sprache erinnert an die Methode der *Analysis by Synthesis* [Risset et al. 1982], bei dem sich Analyse und Synthese von Instrumentalklängen in erkenntnisgewinnender Weise dialektisch verfeinern.

[Vgl. Hartmut Traunmüller 1997, Zur Geschichte der Sprachsynthese, Wolfgang von Kempelens sprechende Maschine <<http://www.ling.su.se/staff/hartmut/kempln.htm>> sowie <<http://www.uni-essen.de/sesam/physiologie/akustik/resonatoren.htm>> (Juli 03)].

2.6. Schwebungen – Rauigkeit – Konsonanz

Die Schwebungen werden sowohl von Praetorius als auch von Mersenne behandelt. Das Phänomen eignet sich zur Auslotung der Grenzen des Tonbegriffs: Wann wird ein einziger, wann werden zwei verschiedene Töne gehört? Wie wirkt sich die physikalische Zusammengesetztheit auf die Empfindungen aus? Praetorius erweist sich hier als

ausgesprochen genauer Beobachter, sieht einen Zusammenhang zur Dissonanz und zur Klangfarbenabhängigkeit der Dissonanz. Mersenne sucht einen Zusammenhang zwischen der Art der Luftbewegung, der Signalgestalt, und den damit verbundenen unangenehmen Empfindungen. Sein Erklärungsmuster darf als „psychoakustisch“ im modernen Sinn gelten.

Beeckmans Koinzidenztheorie der Konsonanz wird in der Folgezeit vielfach wieder aufgegriffen. Es ist zu unterscheiden zwischen dem direkt positiven Effekt der Koinzidenz und einer negativen Bestimmung durch fehlende Störungen wie zum Beispiel bei Helmholtz. Die Koinzidenztheorie, ist bei Kenntnis des Obertonphänomens auch auf den Einzelton anwendbar. Die periodische Struktur des zusammengesetzten Impulsmusters der Teiltöne wird dabei als Verschmelzungsfaktor gedeutet.

2.6.1. Praetorius

Im Zusammenhang mit dem Stimmen von Musikinstrumenten kommt Praetorius auf das Phänomen der Schwebungen zu sprechen. Die Schwebungen kommen offenbar nur deshalb zur Sprache, weil ihre Beachtung das Stimmen von Instrumenten erleichtert. Als Phänomen der Wahrnehmung sind Schwebungen für Praetorius nicht von Interesse. Die Erscheinung scheint nicht einmal einen eigenen Absatz zu rechtfertigen. Aber immerhin findet sich ein Eintrag im Index zu „Schweben“ [Praetorius 1619/II, 225]

Das wort Schweben aber ist ein Orgelmacherischer *Terminus*, und wird von jnen gebraucht/ wenn eine *Concordantz* nit reine stehet: Ist aber bei jnen/ und daher bey vielen Organisten so sehr ublich/ daß es schwerlich abzuschaffen. Dannenher ichs im künfftigen auch (wiewohl ganz ungern) gebrauchen müssen/ nur das dabey gesatz/ hoch oder niedrig. Dann schweben sol so viel heissen/ wie unrein/ das ist/ entweder zu hoch oder zu niedrig gestimmt/ sie *derivirens* aber daher; Wann man in den Orgeln/ sonderlich die *Octaven*, *Quinten* und *Quarten* einziehen und stimmen wil/ so schwebt der *Resonantz* und klang in den Pfeiffen/ und schlägt gleich eim *Tremulant* etliche Schläge: Je näher man es aber mit dem einstimmen zur reinigkeit und *accort* bringt/ je mer verleurt sich die schwebung allmehlich/ und werden der schläge jimmer weniger/ biß so lang dz die *Octava* oder andere *concordanten* recht eintreten. Daher dann aus solcher schwebung die *Dissonantien* in Orgeln viel leichter und ehe/ als in den Regaln/Clavizymbel und der gleichen *Instrumenten observirt* und erkant werden können.
[Praetorius 1619/II, 151]

Nicht ersichtlich wird, weshalb Praetorius den Begriff *Schweben* ablehnt. Immerhin hat das Deutsche im Unterschied zum Französischen einen eigenen Begriff mit klarer Extension und die Beschreibung „so schwebt der *Resonantz* und klang in den Pfeiffen“ verwendet ja selbst wieder das Definiendum allerdings in seiner Alltagsbedeutung. Diese Formulierung zeigt einmal mehr die naive Vorstellung Praetorius' zum Hörvorgang: Das Schweben findet in den Pfeifen und nicht in den Ohren statt! Gleichzeitig ist aber auch das Phänomen als Interferenzerscheinung gekennzeichnet.

Die Genauigkeit der Intonation, die im Deutschen mit Reinheit umschrieben wird, hat auch einen moralischen Aspekt, der bei Praetorius durchaus mitgemeint sein dürfte. Die Implikationen „rein → zur Ehre reichend“ und „unrein → unsittlich“ sind auch auf Klänge applizierbar. Das von Mersenne im gleichen Zusammenhang [vgl. Kap. 2.7.2] konstatierte *rude* – ins moralisch neutrale deutsche *rau* übertragbar – hat diese wertende Komponente in weit geringerem Ausmass. Das Adjektiv *rau* wird von Praetorius nirgends auf Töne oder Klänge angewendet, wohl aber *schnarrend*, *brummend*, *kirrend*.

Der nicht wertende Vergleich eines schwebenden Zusammenklanges mit dem Tremulanten zeigt die Nähe des modifizierten Einzeltons zur Gleichzeitigkeit mehrerer Töne. Es korrespondiert damit die zweifache Auslegung einer Schwebung als Summe (Überlagerung) oder als Produkt (Amplitudenmodulation). Auch dies ein Beispiel, wo aus Gleichheit der Wirkung nicht auf Gleichheit der Ursachen zurückgeschlossen werden kann. Vielleicht ist in dieser Ungleichheit der Ursachen die Abneigung Praetorius' gegen den Begriff *Schweben* begründet. Im Tremulanten gibt es keinen irgendwo dazwischen schwebenden Ton.

Hervorzuheben ist, dass sich Praetorius' Schwebungsbegriff allgemein auf *Concordantzen*, nämlich Quarten, Quinten und Oktaven, bezieht. Der einfachste Spezialfall, das verstimmte Unisono wird nicht einmal erwähnt. Allerdings ist anzunehmen, dass der Einklang implizit unter den Oktaven mitgemeint ist, ganz analog wie eine Quinte auch eine Duodezim sein kann.

Gründe, weshalb die mit Schwebungen verbundene Dissonanzwahrnehmung bei Orgelpfeifen ausgeprägter als in andern Instrumenten ausfällt, sind trotz der Formulierung „Daher denn“ nicht ersichtlich. Sie wären etwa in den Tondauern, der stationären Lautheit oder in der Zusammensetzung der Orgeltöne aus Teiltönen zu suchen. Die ersten beiden Erklärungen sind für Praetorius implizit auszuschliessen wegen des Vergleichs mit dem Regal. Dass er die dritte Erklärung nicht gibt und auch nicht geben kann, dürfte an seinem eher *synthetischen* als *analytischen* Verständnis des Obertonphänomens liegen. Das Zusammenbringen mehrerer Töne zu einem Ton mit neuer Klangqualität entspricht viel eher die Vorstellung einer chemischen Verbindung als die einer physikalischen Mischung, in der die Eigenschaften der Komponenten noch erkennbar sind. Die Konstatierung einer Abhängigkeit der Dissonanz von den Schwebungen und von der Klangfarbe rückt Praetorius in die Nähe zu Helmholtz. Allerdings steht nicht das empfundene Subjekt im Zentrum. Schwebungen, Dissonanz und Klangfarbe sind autonom in den Schallquellen vorgegeben. Sie sind nicht erst das Ergebnis der Reizverarbeitung im Gehör.

2.6.2. Mersenne

Il semble neantmoins que toutes ces qualitez qui rendent les Sons mal plaisans, ne sont autre chose que la difformité des mouuements de l'air, dont le Son est doux, quand il se meut vniformement; & rude, aspre & aigre, lors qu'en mesme temps il se meut de deux, ou de plusieurs façons differentes; ce que l'on peut prouuer par le Son de deux ou de plusieurs flustes, ou tuyaux d'Orgues, qui sont vn peu esloignez de l'vnisson, car encore que leurs Sons pris en particulier & separément soient doux & agreables, neantmoins il sont rudes & desagregables quand on les assemble; parce que leurs mouuement frappent diuersement l'oreille en mesme temps, & la tiraillent d'vn costé & d'autre [Mersenne 1636/I, 29-30]

Es scheint, dass alle diese Qualitäten, die die Töne unangenehm machen, nichts anderes sind als die Unförmigkeit der Bewegungen der Luft, wobei der Ton süß ist, wenn sie sich gleichförmig bewegt, und roh, rau und bitter, wenn sie sich zur gleichen Zeit auf zwei oder mehrere Arten bewegt; was man beweisen kann durch den Ton zweier oder mehr Flöten oder Orgelpfeifen, die ein wenig vom Einklang abweichen, denn ihre Töne einzeln genommen sind süß und angenehm, aber rau und unangenehm, wenn man sie zusammenbringt, weil ihre Bewegungen das Ohr gleichzeitig verschieden schlagen und es von einer Seite zur andern ziehen.

Genau wie Helmholtz bringt Mersenne die Schwebungen mit der Rauigkeit in Verbindung. Seine psychoakustische Betrachtungsweise kommt in der Gleichsetzung von „mal plaisans“ und „difformité des mouuements de l'air“ sehr schön zum Ausdruck.

Eine Mischung von leicht verstimmten Unisonotönen scheint nach seiner Bestimmung noch immer **ein** Ton zu sein. Allerdings lässt das französische *son* Interpretationsspielraum in seiner Ambivalenz mit den deutschen Begriffen *Ton* und *Klang*.

Ob ein Einzelton aus einer einzigen Schallquelle (aufgrund von Partialtonschwebungen hoher Ordnung) rau sein kann, wird zwar nicht explizit gesagt. Die Stelle ist aber klar in der Dimensionsbetrachtung und Diskussion der Klangqualitäten des isolierten Einzeltones eingebettet. Anders als bei Praetorius, wo die Schwebungen Effekt einer unvollkommenen Synthese sind, ist bei Mersenne die Klangqualität der Rauigkeit eines Tones Ausgangspunkt der Betrachtung. Das Beispiel des schwebenden Flöten- und Orgelunisonos hat den Zweck, zu beweisen, dass die Ungleichförmigkeit der Luftbewegung die Ursache der unangenehmen Empfindung ist. Ob diese Ungleichförmigkeit durch eine oder mehrere Schallquellen verursacht ist, hat für Mersenne keine Bedeutung. Denn der Ton ist die Wirkung der Luftbewegung auf das Gehörorgan. Diese Stelle bedeutet eine klare Abwendung von der von Mersenne immer wieder behaupteten Kongruenz zwischen Schallquelle und Wahrnehmung und nimmt die eigene „moderne“ Definition des Tons als Schwingung ernst: Die Einzeltöne der Flöten wirken süß und angenehm, ihr Zusammenspiel im verstimmten Unisono dagegen rau. Die Konfiguration der Instrumente im Raum hat keine damit korrespondierende raue Oberfläche.

Die Unförmigkeit der Luftbewegung zu verstimmten Unisonotönen ist für Mersenne evident. Leider. Denn gerade hier nachzuhaken hätte sich gelohnt. Ein tiefergehendes Verständnis der Superposition als Summenschwingung hätte gewinnbringend zur Deutung der Obertöne bei Saiten beitragen können.

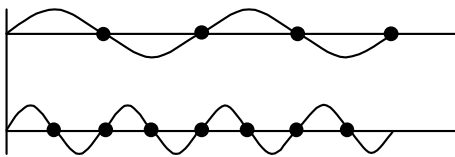
2.6.3. Beeckman

Beeckman formuliert seine Theorie der Konsonanz zwischen 1614 und 1615, drei oder vier Jahre vor seiner Bekanntschaft mit Descartes. Sie wird von diesem ohne Quellenangabe übernommen. Unter dem Paradigma der Schallteilchen erklärt sie die Konsonanzempfindung mit den gleichen Mitteln wie das Phänomen der Obertöne. Konsonanz ist umgekehrt proportional zur Unterscheidbarkeit ihrer Komponenten, das heisst Verschmelzung. Sie ist Folge synchronisierter Bewegungen.

Jam verò diapason consonantia parum differt ab unisono. Eo enim tempore quo vox inferior aures ferit semel, superior ferit bis, ita ut saltem unus sit sonus vocis superioris qui aures ferit antequam vox superior pervenit, etiam si simul moveantur utræque. At secundus sonus superioris coincidit cum tempore quo vix inferior tangit aures. Tertius sonus superioris vocis iterum medius fit inter sonum primum et secundum vocis inferioris, id est impares soni vocis superioris semper fiunt in ipsis pausis vocis inferioris. [Beeckman 1604-1634/I, 53: Apr.1614-Jan 15]

Ausserdem unterscheidet sich die Konsonanz der Oktave wenig vom Einklang. In der gleichen Zeit, in der die untere Stimme das Ohr einmal schlägt, schlägt es die obere Stimme zweimal, so dass es mindestens einen Ton der oberen Stimme gibt, der das Ohr trifft, bevor die untere Stimme ankommt, auch wenn beide gleichzeitig bewegt worden sind. Und der zweite Ton der oberen Stimme fällt zusammen mit der Zeit, in der die untere Stimme das Ohr trifft. Der dritte Ton der Oberstimme wiederum bildet die Mitte zwischen dem ersten und zweiten der Unterstimme, d.h. die ungeraden Töne der Oberstimme fallen immer in die Pausen der Oberstimme.

Der erste Schlag der Oberstimme trifft vor dem ersten Schlag der Unterstimme am Gehör ein, auch wenn die beiden Töne in den Schallquellen gleichzeitig beginnen. Nimmt also Beeckman wie Aristoteles eine tonhöhenabhängige Ausbreitungsgeschwindigkeit an? Die Tonhöhe ist durch die Frequenz der Impulsmuster am Gehör bestimmt. Da der zweite Impuls des oberen Tons immer mit dem ersten Impuls des tieferen Tons zusammenfällt, ist die Annahme unplausibel. Eine Vergrößerung der Entfernung der Schallquellen hätte bei einer frequenzabhängigen Ausbreitungsgeschwindigkeit nämlich zur Folge, dass mehr als nur ein Impuls der Oberstimme vor dem ersten Impuls der Unterstimme im Gehör auftreffen könnte. Die Schwierigkeit lässt sich durch die Deutung von „*simul moveantur*“ auflösen. Was bedeutet die Gleichzeitigkeit des Toneinsatzes? Fasst man den Toneinsatz bei der Saite als Beginn ihrer Bewegung auf, kann diese Verschiebung um eine halbe Periode des tieferen Tones mit der Korpuskelauffassung und Beeckmans Vorstellung der Entstehung der Schallteilchen begründet werden. Die Salven der Schallteilchen werden immer dann von der Saite weggeschleudert, wenn die kinetische Energie der Saite am grössten ist, das heisst zum Zeitpunkt ihres Durchgangs durch die Ruhelage. Der erste Nulldurchgang der Oberstimme erfolgt aber in der halben Zeit, wie der erste Nulldurchgang der Unterstimme, wenn die Bewegung der beiden Saiten gleichzeitig beginnt.



Beeckmans Auffassung der synchronisierten Impulsmuster als Grundlage der Konsonanzempfindung ist also ganz im Gegenteil nur unter Annahme einer konstanten Schallausbreitungsgeschwindigkeit sinnvoll. Konsonanz ist als Erscheinung am Gehörorgan und nicht an der Schallquelle charakterisiert. Dass sich die synchronisierte Bewegung der Schallquellen dem Gehör als gleichartig synchronisierte Impulsmuster mitteilt, ist nur bei konstanter Übertragungsgeschwindigkeit möglich. Beeckman äussert sich meines Wissens nie direkt zur Ausbreitungsgeschwindigkeit des Schalles.

Das Vergnügen an dieser einfachsten Form zusammengesetzter periodischer Strukturen, nicht nur in der Zeit, scheint eine allgemeine menschliche Vorliebe zu sein:

Talis facilitas sectionis bifaria reperitur in divisionibus materialium divisione logicâ, in opticis figures et mechanicis operibus, in quibus ad dextram omnes columnæ respondent numero columnis quæ sunt ad sinistram. Sic fit delectatio cum quis se saltando bis vertit, quando alter se vertit semel. Sic in tactu magnam identitatem, et nescio quid præterea senties, si quis te tangat semel, dum alter te bis tangit. [Beeckman 1604-1634/I, 54: Apr.1614-Jan 15]

Eine solche Fähigkeit der Zweiteilung zeigt sich auch in den Teilungen der Materialien in der logischen Zergliederung, in optischen Figuren und in mechanischen Werken, in welchen die Säulen rechts der Zahl der Säulen antworten, welche auf der linken Seite sind. So entsteht Vergnügen daran, wenn beim Tanzen der eine sich zweimal dreht, während sich der andere einmal dreht. Was kannst du im Takt mehr an grosser Identität empfinden, als wenn dieser dich einmal berührt, während der andere dich zweimal berührt.

Aus der Einfachheit der kombinierten Bewegungsmuster ergibt sich für Beeckman die folgende Reihenfolge der Konsonanzen. Oktave, doppelte Oktave, Quinte, Quarte, grosse und kleine Terz. Die doppelte Oktave (1 : 4) ist ferner die bessere Konsonanz als die Duzim (1 : 3) [Beeckman 1604-1634/I, 54: Apr.1614-Jan 15]. Eulers Konsonanzauffassung erweitert diejenige Beeckmans nur insofern, als er die Komplexität der Impulsmuster durch eine Formel bestimmt.

Die Herausgeber-Fussnote von de Waard zum obigen Zitat lautet:

Notons que Beeckman expose le premier dans les lignes suivante une théorie pot déterminer mathématiquement l'ordre des consonances d'après leur douceur ou excellence. Avec beaucoup d'autres il communiqua aussi les considérations suivantes en 1618 à Descartes; elles seront relevées encore dans la correspondance de Beeckman avec Mersenne et Descartes en 1629 et 1630 [Beeckman 1604-1634/I, 53: Apr.1614-Jan 15]

In der Zeit seiner Begegnung mit Descartes 1618 setzt sich Beeckman weiter mit den Impulsmustern der Konsonanzen und der daraus abzuleitenden Reihenfolge auseinander. Insbesondere beschäftigt ihn die Frage der Wahrnehmbarkeit subharmonischer Frequenzen. Diese Erwägungen stehen in Zusammenhang der Bewertung der grossen Terzen und Quartan im Vergleich zur Quinte.

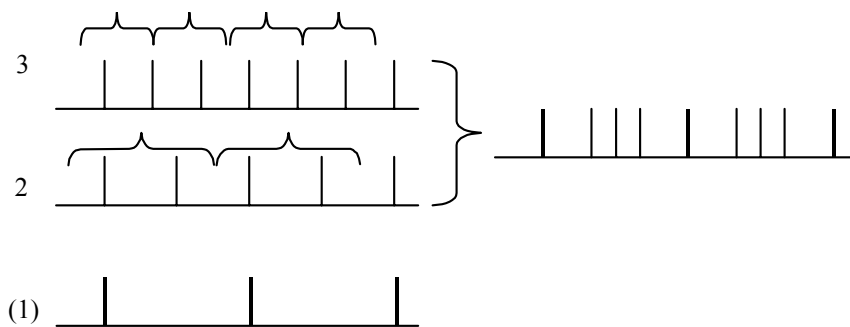
Cùm hæc ita se habeant voxque perpetuò languescat magisque continua fiat, si vox aliqua solitaria audiat, hæc suos ictûs nunquam multiplicabit, ideòque non referet unquam sonum acutorem, quia is multiplicatis ictibus constat. Non igitur octava ejus acutior subauditur, sed cùm, ut patuit, vox se contrahat, ac pauciores ictus languescens præ se ferat, æque multas ab utrâque parte quietes absorbendo ([...]) |, patet octavam graviolem, quæ paucioribus ictibus explicatu, repræsentari et subaudiri.

Cùm jam duæ voces simul sonant differuntque per diapente, gravior vox, duobus ictibus constans, languescendo continuum ictum repræsentant constituitque octavam graviolem. Acutior verò, etsi etiam languescendo ad continuitatem tendat, quia tamen medietas hujus non quies, sed medietas ictûs est (constat enim tribus ictibus), quæ utrimque silentio clauditur, non potest bisecari in partes duas uniformes. Unum enim silentium alter ictus præcedit, aliud alter ictus sequitur, ita ut perpetuò formam trium ictuum obtineat quamdiu auditur, neque unquam octavam graviolem potest repræsentare, quæ integris ictibus constat, <et> non ut hæc: dimidio ictu, totâ quiete, toto ictu, totâ quiete, dimidio ictu. [Beeckman 1604-1634/I, 250 (Fol. 102r-102v), 23. Nov.-26. Dez. 1618]

Weil, Da eine Stimme, je länger sie dauert umso matter wird, verhält es sich so, dass wenn eine einzelne Stimme gehört wird, diese niemals ihre *ictûs* vervielfacht, weshalb sie nie einen höheren Ton erklingen lässt, da ein solcher aus vervielfachten *ictibus* besteht. Deshalb kann nie seine höhere Oktave mitgehört werden, aber weil sich die Stimme scheinbar zusammenzieht und im Verklingen weniger *ictus* vor sich herträgt und indem sich viele Ruhezeiten gegenseitig verschlucken [...], scheint die tiefere Oktave, welche durch weniger *ictibus* zu erklären ist, dargestellt und mitgehört zu werden. Wenn also zwei Stimmen gleichzeitig in der Quinte erklingen, stellt die tiefere Stimme, die aus zwei *ictus* besteht, in ihrem Verklingen einen kontinuierlichen *ictus* dar und konstituiert die tiefere Oktave. Die höhere [Stimme] aber, selbst wenn sie in ihrem Verklingen zur Kontinuität neigt – weil aber in ihrer Mitte keine Ruhe ist, sondern der mittlere *ictus* kommt (sie besteht nämlich aus drei *ictibus*), welche beidseitig durch Stille abgetrennt wird –, kann nicht in zwei gleichartige Teile zerlegt werden. Eine Ruhephase geht nämlich dem mittleren Schlag voraus, die andere folgt ihm, so dass fortwährend die Form dreier Schläge entsteht und dauernd gehört wird, und nie kann sie die tiefere Oktave, die aus ganzen Schlägen besteht darstellen, und nicht wie diese in: Schlag, ganze Stille, ganzer Schlag, ganze Stille, halber Schlag.

Die Stelle ist nicht einfach zu verstehen, da Beeckman die Ruhephasen zwischen zwei

Impulsen in die Gliederung einbezieht und diese als Referenzpunkte wählt:



Von der Mitte einer Ruhephase aus zählend fällt die Mitte einer Dreiergruppe exakt auf ihren zweiten Schlag. Die Gruppierungen werden über dem Raster der Periodizität des Gesamtmusters, das heisst bezüglich der Unteroktave des tieferen Tons vorgenommen. Diese Periodizität verhindert eine Zweiergruppenbildung in der Oberstimme, legt aber eine solche in der Unterstimme nahe.

Die Periodizität wird als Ton repräsentiert und mitgehört. Dieses Mithören entsteht durch eine Strukturierung des Impulsmusters durch das Gehör. Beeckman diskutiert hier die Möglichkeit der Periodiktöne als Folge der kombinierten Impulse! Sie wird dazu entwickelt, um die Quarte gegenüber der Quinte und grossen Terz abzugrenzen. Die Quarte ist deshalb unharmonisch [„inconnitas diatessaron“, 250], weil ihre Unterstimme sich nicht durch (iterierte) Zweiteilung auf den Periodikton, den „Fundamentalbass“ beziehen lässt. Bei Quinte und grosser Terz hingegen repräsentiert der tiefere Ton stellvertretend die Periodizität. Es ist denkbar, dass Beeckman durch Descartes auf die Sonderrolle der Quarte – sie wird in Descartes' *Compendium* [1619] ausführlich gewürdigt – hingewiesen wurde. In der früheren Fassung von Beeckmans Koinzidenztheorie [1614, s.o.] rangiert die Quarte noch zwischen Quinte und grosser Terz. Die Ausgrenzung der Quarte erfolgt durch eine asymmetrische Gewichtung der beiden Töne eines Intervalles zu Gunsten des tieferen: „auditus enim graviorem vocem semper substernit“ [251].

Die Postulierung subharmonischer Töne steht in keinem Widerspruch zu Beeckmans späterer Erklärung der Obertöne [s.o.], denn die Obertöne entstehen bei der Schallerzeugung und nicht erst bei der Rezeption.

2.6.4. Descartes

Der Vergleich der Quinte mit der Duodezim weist auch Descartes als Vertreter der Koinzidenztheorie aus. Er sieht sich als deren geistiger Urheber:

Il est certain que les retours de deux cordes qui font la douziesme & sont l'une a l'autre comme 1 a trois, se rencontrent ensemble deux fois aussi souvent que celles qui font la quinte & sont l'une a l'autre comme 2 a 3. J'ay retiré depuis vn mois l'original du petit traité ou ie l'explique, duquel vous auez vû vn extrait; il a demeuré vnze ans entre les mains du Sr. Becman, & si ce tans suffit pour la prescription, il a droit de se l'attribuer. [Descartes, A.T./I, Brief an Mersenne, 18. 12. 1629, 100]

Es ist gewiss, dass die Rückläufe zweier Saiten, die die Duodezim bilden und die sich zueinander wie 1 zu 3 verhalten, sich doppelt so häufig treffen, wie wenn sie in der Quinte stehen. Ich habe vor einem Monat den kleinen Traktat, wo ich das erkläre und von dem Sie einen Teil gesehen haben, zurückgenommen; er war elf Jahre in den Händen des Herrn Beeckman und wenn diese Zeit zur Verjährung ausreicht, dann hat er Recht, es sich selbst zuzuschreiben.

Im Unterschied zu Beeckman geht Descartes bei der Schallausbreitung nicht von einem Materietransport aus. Nach der rein technischen Beschreibung der Saitenbewegung kommt er auch auf die verschmelzende Wirkung des periodischen Zusammengehens der beiden Stimmen zu sprechen:

Ainsy donc ilz ne recommencent ensemble que de 2 momans en 2 momans, au lieu que les precedens recommencent ensemble a tous les momens, ce qui fait que les sons se meslent mieus & font vne plus douce harmonie. [Descartes, A.T./I, Brief an Mersenne, 18. 12. 1629, 101]

Sie beginnen also [in der Quinte] nach jedem zweiten Moment wieder miteinander, anstatt wie im vorhergehenden [in der Duodezim], wo sie nach jedem Moment wieder miteinander beginnen, was bewirkt, dass sich die Töne besser mischen und eine süßere Harmonie bilden.

Ein *momans* ist im Kontext ad hoc definiert als die Zeit, die der tiefere Ton für ein Hin und Zurück benötigt. Wenn allein die Häufigkeit des Zusammentreffens für den Konsonanzgrad verantwortlich ist, wird dieser bei fester Intervallgrösse abhängig von der Lage. Descartes setzt voraus, dass die Intervalle in ihrem tieferen Ton übereinstimmen. Hält man stattdessen beim Vergleich von Duodezim und Quinte den oberen Ton konstant, gibt es bezüglich des zeitlichen Zusammengehens keinen Unterschied. Descartes kann im Unterschied zu Beeckman zur weiteren Differenzierung nicht die Komplexität des kombinierten Impulsmusters – dieses ist im Falle der Quinte komplexer als bei der Duodezim – geltend machen, da bei ihm Schall nicht in Form von Impulsen rezipiert wird. Die Koinzidenzauffassung der Konsonanz macht eigentlich im Rahmen der Wellenlehre erst Sinn, wenn das Superpositionsprinzip vorausgesetzt wird. Zwei gleichzeitige Töne bewirken in der Luft eine Summenwelle. Ihre Periodizität ist Descartes' obiger Auffassung zufolge Mass für die Dissonanz eines Zusammenklang. Eine weitere Differenzierung müsste den Zeitverlauf der Summenfunktion der zu vergleichenden Intervalle bewerten. Unter Voraussetzung des Superpositionsprinzip – es findet sich in Ansätzen bei Mersenne, nicht aber bei Descartes – stellt sich die Frage nach der Verschmelzung umgekehrt: Wie kommt es, dass die beiden gleichzeitigen Töne, die in jedem Fall in der Luft zu einer Summenschwungung „verschmelzen“, dennoch vom Gehör auseinandergehalten werden können?

2.7. Klangqualität

Choisissez tel son que vous voudrez, & l'oyez continuellement, il vous endormira, ou vous fera mal à la teste. [...] C'est donc la variété qui rend le son agreable & s'il n'est varié, il merite plutost d'estre appellé bruit que son harmonique [Mersenne 1636/I, 12]

Die beiden folgenden Abschnitte thematisieren die Art des Sprechens über die Verschiedenheiten des Klangs der Musikinstrumente. Im Hintergrund mitgedacht wird dabei an den Anspruch quantitativ orientierter Geisteswissenschaften mit Hilfe von Verfahren der Reduktion, aus einer Begriffsvielfalt einige wenige von einander unabhängige Begriffspolaritäten zu extrahieren, ohne dabei etwas Wesentliches zu verlieren. Die Theorie der Signalverarbeitung stellt dem den Begriff der verlustfreien Kompression zur Seite [vgl. Kap. 8, 8.4].

In diesen Zusammenhang gehören die Methoden der Faktoranalyse und der Multidimensionalen Skalierung, wie sie von modernen Klangforschung zur Ermittlung

sogenannter *timbre spaces* eingesetzt werden. Das Augenmerk gilt also letztlich der von Praetorius behaupteten Inkompatibilität von Qualität und Quantität. Die Aufstellung von Klangfarbenräumen führt entweder zu einer Verschiebung der Grenze zwischen Quantität und Qualität, bis von letzterer nichts mehr übrig bleibt oder was fast auf das Gleiche hinausläuft zu einer Quantifizierung oder Verräumlichung des Qualitativen.

2.7.1. Praetorius

Folgende Liste von Adjektiven zur Charakterisierung von Tönen dokumentiert Praetorius' diesbezüglich reichhaltige Vokabular (ohne Anspruch auf Vollständigkeit):

absonderlich allerlieblichst anmutig, anmütig
 besser bestendig brummend
 dumpicht
 ehlichst
 fein flach frembd frisch
 gebrochen gewaltig grewlich grob gut gut und frembd
 hart hell hoch hol
 lange lautt lieblich
 kirrend klein klingendt
 langsam anfallend
 mittelmessig
 natürlich niedrig nieder
 plattwegfallend pompend
 recht verstendlich rein
 sanfft scharff schnarrend schön sonderlich starck still subtil süß
 thönendt thun tieff
 unnatürlich
 voll vernehmlich vornehmlich vorstendlich
 wohlklingend
 zierlich

Diese zahlreichen Adjektive lassen sich durch eine intuitive Klassifizierung kaum auf wenige Begriffspaare reduzieren. Die Zahl unabhängig von einander variierbarer Eigenschaften scheint recht gross sein. Es dürften mindestens 5 bis 6 Dimensionen übrigbleiben, wobei im Unterschied zu Mersenne dabei die Angaben zur Lautstärke mit inbegriffen sind. Eine solche faktoranalytische Klassifizierung ist allerdings nicht im Sinne von Praetorius. Die qualitativen Merkmale scheinen sich einer Quantifizierung zu entziehen.

Einige der Adjektive sind zu abstrakt und wertend, um einen psychophysikalischen Zusammenhang erkennen zu lassen (*gut, schön, fremd, sonderlich, natürlich, mittelmessig*), andere evozieren klare Klangvorstellungen (*hell, hol, dumpicht, schnarrend, scharff, thun*), einige charakterisieren den Klangverlauf (*bestendig, langsam anfallend, plattwegfallend*). Nur wenige stammen aus andern Sinnesmodalitäten (*hell, süß*). *Hell* ist allerdings ursprünglich ein akustischer Begriff.

2.7.2. Mersenne

Die ausführlichste Besprechung der Klangqualitäten per se findet sich im gleichen Kapitel wie die Zuordnung der Raumdimensionen [vollständige Wiedergabe und Übersetzung im Anhang [E]]:

[...] ie viens à ses autres accidens, qui sont quasi

[...] ich komme jetzt zu den anderen Akzidenzien,

en aussi grand nombre que les differences
exterieures des corps qui le produisent, dont il y a
plusieurs proprietes que l'on n'a pas encore
cogneu.

von denen es eine ebenso grosse Zahl gibt wie die
äusseren Unterschiede der Körper, die ihn
hervorbringen, von denen es mehrere
Eigenschaften gibt, die man noch nicht gekannt
hat.

à ses *autres* accidens : Diese vorher besprochenen Merkmale, die den Raumdimensionen
zuweisbar sind, sind demnach auch Akzidentien. Dimension und Akzidenz sind begrifflich
nicht scharf getrennt. Aber auch Qualitäten und Akzidentien sind weitgehend synonym:

Or entre les qualitez du Son, qui toutes dependent
de la maniere dont les corps pressent, froissent &
frappent l'air, celles qui donnent le nom aux Sons
aspres, aigres, rudes, doux, clairs, estouffez, &c.
sont les principales apres le grave & l'aigu: car
quant aux autres qui portent le caractere des
corps, par lesquels ils sont produits, l'on peut en
establir vne science, à raison qu'ils vont presque à
l'infiny [...]. [Mersenne 1636/I, 29]

Unter den Qualitäten des Tons, welche alle von
der Art, wie die Körper die Luft pressen, schütteln
und schlagen, abhängen, sind diejenigen welche
den Tönen die Bezeichnungen rau, bitter, roh,
süss, hell, dumpf etc. geben, die hauptsächlichsten
nach der Tiefe und Höhe: denn was die ändern
anbelangt, die den Charakter der Körper, durch
welche sie produziert werden, tragen, kann man
darüber eine Wissenschaft etablieren, denn sie
gehen fast ins Unendliche

Die Qualitäten des Tones sind vollständig durch Luftbewegungen bestimmt. Die Unterteilung
der Qualitäten in solche, die die Eigenschaften der Klangkörper direkt zum Ausdruck bringen
und solche, die durch die aufgelisteten abstrakten Adjektive erfasst werden, bewegt sich an
der Grenze zum Widerspruch. Mit Ausnahme von *estouffez* sind diese Adjektive alle auch auf
andere Sinne anwendbar. Sie beschreiben diejenigen Qualitäten, für welche Mersenne
Charakteristika der zugehörigen Luftbewegungen angeben kann. Die Rückführung der
offenbar synonym verwendeten Begriffe *aigre* und *aspre* für Klangqualitäten auf
Besonderheiten einer ungleichmässigen Luftbewegung ist gleichzeitig die Erklärung für den
sinnenübergreifenden Wortgebrauch:

Quant à l'aspretè & à l'aigreur des Sons, elle vient
de l'inesgalité de la surface des corps qui frappent
ou qui divisent l'air, comme il arriue au bruit qu'on
fait en limant du fer, ou quelque autre metal: car la
lime rompt l'air en autant de parties, comme elle a
de grains & d'eminences; & lors que l'air divisé &
rompu frappe les esprits du nerf de l'ouye, il leur
imprime son mouuement, qui leur done autant de
mescontentement, comme les sauueurs aspres à la
langue & comme les surfaces rudes, brutes et mal
polies au toucher[...]. [Mersenne 1636/I, 29]

Was die *Rauigkeit* und *Bitterkeit* der Töne betrifft,
kommt sie von der Unregelmässigkeit der
Oberfläche der Körper, die die Luft schlagen und
zerteilen, wie es geschieht beim Geräusch, das
man beim Feilen von Eisen oder irgendwelchem
ändern Metall macht : denn die Feile bricht die
Luft in ebenso viele Teile, wie sie Körner und
Ausbuchtungen hat; und sobald die zerteilte und
gebrochene Luft die Gehörnerven schlägt, prägt
sie ihnen ihre Bewegung auf, welche ihnen
ziemliches Missvergnügen bereitet wie die
bitteren Geschmäcke der Zunge und wie die
rauen, rohen und schlecht polierten Oberflächen
dem Tastsinn [...]

Es folgt ein Hinweis auf die wortmalerische Komponente der Adjektive *brute*, *rude*, *aspre*.
Das Gegenteil, die gleichmässige Luftbewegung, ist durch *douce* und *agreable* charakterisiert:

Il semble neantmoins que toutes ces qualitez qui
rendent les Sons mal plaisans, ne sont autre chose
que la difformité des mouuements de l'air, dont le
Son est doux, quand il se meut vniformement; &

Dennoch scheint es, dass alle diese Qualitäten, die
die Töne unangenehm machen, nichts anderes sind
als die Unförmigkeit der Bewegungen der Luft,
wobei der Ton süss ist, wenn sie sich gleichförmig

rude, aspre & aigre, lors qu'en mesme temps il se meut de deux, ou de plusieurs façons differentes; ce que l'on peut prouuer par le Son de deux ou de plusieurs flustes, ou tuyaux d'Orgues, qui sont vn peu esloignez de l'vnisson, car encore que leurs Sons pris en particulier & separément soient doux & agreables, neantmoins il sont rudes & desagreables quand on les assemble; parce que leurs mouuement frappent diuersement l'oreille en mesme temps, & la tiraillent d'vn costé & d'autre [Mersenne 1636/I, 29-30]

bewegt, und roh, rau und bitter, wenn sie sich zur gleichen Zeit auf zwei oder mehrere Arten bewegt; was man beweisen kann anhand des Klangs zweier oder mehrerer Flöten oder Orgelpfeifen, die ein wenig vom Einklang abweichen, denn ihre Töne einzeln genommen sind süß und angenehm, aber rau und unangenehm, wenn man sie zusammenbringt, weil ihre Bewegungen das Ohr gleichzeitig verschieden schlagen und es von einer Seite zur andern ziehen.

Damit sind die Töne in mindestens vier Dimensionen (im Sinne von Descartes) quantifizierbar. Denn sie sind in den gegenseitig unabhängigen Paaren *hoch/tief*, *lang/kurz*, *laut/leise*, und *rau/süß* variabel. Und bei diesen Dimensionen hat Mersenne auch klare Vorstellungen über die zugehörigen Luftbewegungen. Für die übrigen Qualitäten fehlt die Wissenschaft, die aus den schwingenden Körpern, die Gesetzmässigkeiten der Luftbewegungen ableitet und diese auf die korrespondierenden Sinnesempfindungen bezieht. Die oben erwähnte Schwierigkeit löst sich in einen Forschungsauftrag auf.

Die folgende Tabelle illustriert Mersennes Reichtum an klangcharakterisierenden Adjektiven in der *Proposition XXVI* [Mersenne 1636/I, 28-30]:

Dimension		Accidens	
aigu	spitz hoch	aigre	bitter
bas	schrill	aspre	rau
corpulent	tief leise	clair	hell
creux	korpulent	desagreable	unangenehm
deliez	hohl	doux	süß
espais	schlank hell	esclatans	schmetternd
fort	stark dicht	estouffez	gedämpft
fourni	stark	rude	roh
haut	dicht reichhaltig		
large	hoch		
massif	breit		
mince	massiv		
plein	dünn winzig		
pointu	voll		
profond	spitz		
remplis	tief		
subtil	gefüllt		
	durchdringend		

Die Zuordnung zu *Dimension* und *Accidens*, die sich aus dem jeweiligen Anwendungskontext ergibt, lässt einen qualitativen Unterschied der beiden Gruppen erkennen. Alle Adjektive der Dimensionsgruppe lassen nämlich einen Bezug zu quantifizierbaren Eigenschaften materieller Objekte erkennen, sie sind selbst räumlich physikalisch deutbar und können mit Descartes' Dimensionsbegriff eingefangen werden [vgl. Kap. 2.3.3]. Es ist anzunehmen, dass Mersenne die Adjektive dieser Gruppe durch Eigenschaften der Bewegung der schlagenden Luft für objektiv beschreibbar hält. Eine vergleichbare räumliche Quantifizierung der Geschmacksreize, die durch einige der Adjektive der rechten Gruppe angeregt wird, ist fünfdimensional: denn es existieren nach heutiger Erkenntnis fünf verschiedene Rezeptortypen der Geschmacksempfindung ...

3. 18. Jahrhundert: Kakophonie in der Einheit

Sauveur führt um 1701 in Zusammenhang mit dem Obertonphänomen die Begriffe Schwingungsknoten (*nœuds*) und -bäuche (*ventres*) ein. Dadurch können isolierte Partialtöne (bzw. Flageoletttöne) einer schwingenden Saite geometrisch charakterisiert werden. Knoten und Bäuche genügen allerdings nicht, um der simultanen Überlagerung mehrerer Teiltöne gerecht zu werden. Nicht nur ist die Natur der Überlagerung noch weitgehend unverstanden, sondern auch der zu Grunde liegende Tonbegriff wird nicht explizit.

Unter Verweis auf Mersenne und Sauveur verwendet Rameau 1726 das Phänomen der Obertöne zur Rechtfertigung seines harmonischen Systems. Die Harmonielehre soll dadurch auf ein physikalisches Fundament gestellt werden und verlässt den rein symbolischen Umgang mit Proportionen. Rameau gibt 1737 eine Erklärung für die Entstehung und Ausbreitung der Obertöne im Übertragungsmedium, die auf de Mairan [1720, 1737] zurückgeht. Der Fundamentalbass wird dabei als Erzeuger der Partialtonreihe und die Entstehung harmonischer Spektren als der Sache innewohnendes Naturgesetz angesehen. Das Prinzip der einfachen Proportionen ergibt sich dabei als Folge eines allgemeinen Resonanzprinzips zwischen kommensurablen Frequenzen.

Zieht man das Verfassungsdatum (1749) von Rousseaus musikalischen Artikeln für die *Encyclopédie* in Rechnung, lässt sich für die Jahrhundertmitte ein ausserordentlicher Reichtum an Erkenntnis und Theorien konstatieren. Gleichzeitig zur blühenden Schwingungslehre, die zu einer fundierten Analyse der Bewegung der Saite führt – die Saitenbewegung ist ein System mit unendlich vielen Freiheitsgraden –, erhält das zugehörige wahrnehmungspsychologische Korrelat durch Rousseau erstmals einen Namen: *tymbre*. Die Art der Begriffsbildung ist als Katachrese, das heisst metaphorische Übertragung auf einen Sachverhalt oder ein Objekt, das noch keinen Namen hat, anzusehen [vgl. Groddeck 1995, 259-260].

Bemerkenswerterweise wird das Phänomen als weitgehend unerklärbar angesehen, bei Chladni finden sich diesbezügliche Bemerkungen noch bis 1827. Auf Grund der untersuchten Quellen ist für das ganze 18. Jahrhundert also nicht von einem allgemein akzeptierten Zusammenhang zwischen spektraler Zusammensetzung und Klangqualität auszugehen. Überlegungen Rameaus und Tartinis, die in Richtung einer solchen spektralen Theorie weisen, sind – ebenso wie diejenigen von Mersenne, die hundert Jahre zurückliegen – weitgehend unbemerkt geblieben. Zeitgleich zu Rousseaus *Dictionnaire de Musique*, der seinen Erkenntniswunsch aus der *Encyclopédie* wiederholt, gibt Euler 1765 eine ebenfalls unbeachtet gebliebene Erklärung der Klangqualität der Vokale. Da Euler die Zerlegbarkeit beliebiger periodischer Schwingungen in Sinusbausteine bestreitet [Kap. 3.1.6], kommt er über das Studium von periodischen Impulsfunktionen zu einer auf der Zeitstruktur basierenden Deutung der Vokalqualitäten, die mit einer Formanttheorie verträglich ist. Die Theorie ist allerdings instabil unter kleinen Variationen in den Teiltonfrequenzen, das heisst sie ist nicht ohne Weiteres auf quasi-periodische Schallsignale übertragbar. Die gleichen Impulsfunktionen werden später dem Streit zwischen Ohm und Seebeck zugrundeliegen [vgl. Kap. 4.3.2]. Eulers Ansatz wird von Willis [1832] aufgegriffen, und dessen Aufsatz könnte Helmholtz zur Bestimmung der Vokalformanten [1857/1859] angeregt haben. Inharmonische Teiltöne werden seit Beeckman und Mersenne immer wieder bemerkt. Sie werden um etwa 1740 bei Daniel Bernoulli und Euler an der hängenden Kette und am einseitig eingespannten Stab manifest und rechnerisch erfasst [Cannon et al. 1981, 53-69, 123-176]. Systematisch erforscht und am Experiment sichtbar gemacht werden sie durch Chladni. Auf die Musiktheorie bezogen, führt Chladni ihr Vorhandensein gegen Rameaus Auffassung des Grundtons als Erzeuger der harmonischen Obertöne ins Feld. Vergeblich sucht

man bei Chladni allerdings eine spektrale Theorie der Klänge, dies obschon er mit dem Superpositionsprinzip hinlänglich vertraut ist und spektrale Besonderheiten wie zum Beispiel die der gedackten Pfeifen benennt. Offensichtlich zieht er den Aspekt Einheit in der Vielheit nur ungenügend in Rechnung, denn er versteht das Auftreten mehrerer – beliebig angeordneter – Eigenfrequenzen immer als Vielheit von Klängen und nicht als Klang aus Tönen.

3.1. Definition des Tons und Superpositionsprinzip

Cannon, Dostrovsky [Cannon et al. 1981] weisen in ihrer fundierten Quellenanalyse *The Evolution of Dynamics: Vibration Theory from 1687 to 1742* nach, dass durch falsche Auslegung einiger weniger Stellen in Newtons *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* [1687] sich verschiedene „Irrmeinungen“ über die Natur schwingender Systeme und die Wellenausbreitung bis zur Mitte des 18. Jahrhunderts halten konnten. Nämlich:

- Periodische Schwingungen mit vernachlässigbarer Auslenkung und simultaner Achsenquerung sind immer sinusförmig.
- Die Gestalt einer frei schwingenden Saite konvergiert innert weniger Perioden gegen einen halben Sinusbogen unabhängig von der Gestalt ihrer Anfangsauslenkung. Das gleichschenklige Dreieck einer gezupften Saite verwandelt sich demnach innert Kürze in einen Sinusbogen.
- Die Saitenschwingung ist eine Bewegung mit nur einem Freiheitsgrad.
- Die Luft selbst operiert als linearer Oszillator. Eine periodische Impulsfunktion würde demnach als Sinus übertragen.

Die genannten Punkte sind entweder unzulässige Verallgemeinerungen oder inkorrekte Umkehrschlüsse.

Der letzte Punkt stellt an die Erklärung der gleichzeitigen Schallübertragung besondere Anforderungen. Die Phänomene Klangfarbe und Obertöne werden unter diesen Prämissen unerklärbar, da durch die Art der Schallübertragung alle relevanten Unterschiede herausgeglättet werden.

Der erste Punkt behauptet, dass die sogenannte Pendelbedingung äquivalent zu Isochronismus plus simultaner Durchgang durch die Gleichgewichtslage (Nulldurchgang) sei. Die Pendelbedingung ist eine hinreichende Bedingung dafür, dass eine Schwingung sinusförmig verläuft und ergibt sich aus den Newtonschen Gesetzen.

Der zweite Punkt wird auch das Taylorsche Paradoxon genannt. Es führt auf eine Gleichsetzung von Pendelschwingungen (=lineare Oszillatoren) und (Saiten-)Tönen. Von der Sinusgestalt abweichende Schwingungsformen können nur während des Einschwingens auftreten. Alle Unterschiede des Klangs wären demnach im Einschwingvorgang zu lokalisieren.

Dem dritten Punkte zufolge hätte die Gestalt der Anfangsauslenkung, die sich zum Beispiel durch Variation der Anschlagstelle ergibt, keinen Einfluss auf die Bewegung der Saite. Punkt drei ist eine Verschärfung von Punkt zwei.

Der vierte Punkt entspricht dem zweiten, delegiert aber das Problem vom klingenden Körper an die Luft. Die Luft reagiert auf die Periodizität unabhängig von der Gestalt der anregenden Schwingung immer als Sinuswelle.

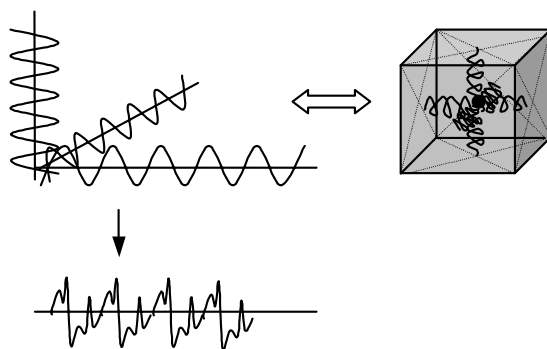
Die ersten drei Punkte kreisen alle um die gleiche Frage. Sie bedeuten die Übertragung der Pendelbewegung auf die Bewegung der Saite oder der Luft und haben letztendlich die Gleichsetzung von Ton und Sinusschwingung zur Folge. Die Bewegung des Fadenpendels ist gut erforscht – die Pendelgesetze wurden von Galileo Galilei 1609 gefunden –, sie ist periodisch und alle Punkte des Fadens und der angehängte Massenpunkt durchqueren die vertikale Achse simultan. Die Geschwindigkeit innerhalb einer Schwingungsperiode verläuft sinusförmig. Dies kann erst unter Anwendung der Newtonschen Gesetze bewiesen werden.

Für kleine Auslenkungen hängt die Periodizität nur von der Länge des Pendels ab. In der Ebene ihrer Schwingungsrichtung hat die Bewegung eines Fadenpendels gegebener Länge den Freiheitsgrad eins, denn sie ist durch die Anfangsauslenkung gegenüber der Vertikalen vollständig bestimmt.

Die sich in obigen Lehrmeinungen widerspiegelnde eindimensionale Sicht auf periodische Schwingungen erklärt, weshalb das Superpositionsprinzip erst gegen Mitte des 18. Jahrhundert erkannt und nutzbar gemacht wird. Bemerkenswerterweise wurde dieses nicht an der schwingenden Saite, sondern an der mathematisch wesentlich komplizierteren hängenden Kette gefunden. Am Beispiel der schwingenden Saite bedeutet das Superpositionsprinzip, dass ihre Bewegung ein System mit *unendlich vielen* Freiheitsgraden darstellt. Alle Möglichkeiten der Bewegung einer Saite, die einzeln auftreten können, können auch kombiniert auftreten. Die kombinierende Überlagerung ist dabei die mathematische Summe der Einzelschwingungen. Eine geometrische Deutung des Superpositionsprinzips versteht die Saitenschwingungen als Punkte in Vektorräumen. Zu gegebener Grundfrequenz entspricht dabei jeder Partialtonfrequenz eine unabhängige Dimensionsrichtung. Die Unabhängigkeit widerspiegelt sich darin, dass die verschiedenen Partialamplituden, die Koordinaten im Vektorraum, unabhängig voneinander variiert werden können. Da eine Saite a priori beliebig viele Teiltöne hervorbringen kann – so zum Beispiel bei dreiecksförmiger Anfangsauslenkung – ist dieser Raum in seiner Dimensionszahl nicht beschränkt. Die Dimensionszahl eines solchen Raumes korrespondiert mit der Zahl der Freiheitsgrade der Saitenbewegung. Die Schwierigkeit liegt darin, dass dieser abstrakte Raum nichts mit unserem dreidimensionalen Lebensraum zu tun hat, ihn auch nicht als Teilraum enthält.

Die obgenannten missverständlichen und missverstandenen Stellen bei Newton erklären andererseits nicht, weshalb das Superpositionsprinzip nicht schon in der Mitte des 17. Jahrhunderts in allgemeiner Form erkannt und verwertet wurde.

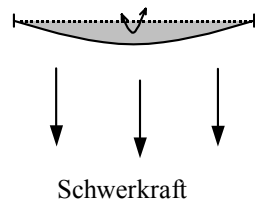
Descartes beispielsweise interpretiert das Obertonphänomen mittels unabhängiger Schwingungen in verschiedenen Raumrichtungen. Er versucht damit den Schwingungsraum in unseren Lebensraum einzubetten. Das heisst Klänge aus mehr als drei Teiltönen sind auf diese Weise nicht interpretierbar. Descartes' Dimensionsbegriff ist sogar so allgemein, dass Strukturen in beliebig vielen abstrakten Dimensionen denkbar sind, und genau dies wird für das Verständnis der Saitenschwingung nötig. Eine besondere Schwierigkeit ist dabei, dass die von einander unabhängigen Schwingungen in die gleiche Schalldruck/Zeit-Ebene projiziert werden, um dort als Summenschwingung in Erscheinung zu treten. Trotz des projektionsbedingten Informationsverlustes erlaubt die Summenschwingung einen eindeutigen Rückschluss auf ihre Bestandteile.



Projektion eines mehrdimensionalen abstrakten Schwingungsraum auf die Ebene Schalldruck/Zeit. Schwingungen in unabhängigen konkreten Raumrichtungen sind höchstens in drei Dimensionen möglich: 3-dimensionaler Oszillator rechts.

Und Mersenne verwendete die beobachtbare Superposition von Wasserwellen als Metapher für die Schallausbreitung, um zu erklären, warum gleichzeitige Übertragung verschiedener Töne im gleichen Medium möglich ist. Er verwirft aber auch seinen richtigen Ansatz zur Erklärung der simultanen Obertöne in einer Schallquelle, weil er die höheren Partialschwingungen nicht gleichzeitig mit der Grundschiwingung beobachten kann. Erst 1740 beobachtet Daniel Bernoulli die Superposition mehrerer Schwingungsmoden bei einer einseitig eingespannten schwingenden Nadel und kann dies auch mathematisch interpretieren [Cannon et al. 1981, 102-103].

Sauveur leitet 1713 bei seiner Bestimmung der Schwingungsfrequenz der Saite ihre harmonische Schwingung daraus ab, dass er sie als ein durch die Erdanziehung parabolisch gekrümmtes, starres Pendel behandelt [Cannon et al. 1981, 23-27]:



Damit reduziert er die Saitenschwingung auf eine Bewegung mit nur einem Freiheitsgrad. Da er bereits seit 1700 mit dem Phänomen der Obertöne [Kap. 3.1.1] vertraut ist, ist nicht anzunehmen, dass er seine zweckgebundene idealisierende Annahme für allgemeingültig hält. Es bleibt also zu fragen, weshalb nicht spätestens er dem Superpositionsprinzip endgültig zum Durchbruch verholfen hat.

Die Texte von Tartini und Mattheson [Kap. 3.1.8 und 3.1.9] – beide nicht als physikalische Untersuchungen konzipiert – stehen über ihre Nähe zu Leibnizschem Gedankengut mit obiger Dimensionbetrachtung und damit dem Superpositionsprinzip im Einklang, ohne allerdings auf die mathematisch-physikalischen Grundlagen einzutreten. Tartini ist vor allem in Zusammenhang mit der Entdeckung der Differenztöne, das heisst einer Situation, in der das Superpositionsprinzip gerade nicht anwendbar ist, bekannt geworden. Differenztöne entstehen, wenn bei der Überlagerung neben den „linearen Termen“ der gewöhnlichen Summe, höhere Terme zu berücksichtigen sind. Es sind also Töne, die in den isolierten Schallquellen nicht vorhanden sind.

Differenztöne entstehen je nachdem in der Luft oder auch erst im Gehör. Zumeist werden in den physikalischen Untersuchungen der Jahrhundertmitte solche „Anomalien“ durch Festsetzung der idealisierenden Annahmen im Vorhinein ausgeschlossen. Eine schlüssige Erklärung gelingt erst Helmholtz [vgl. Kap. 4.2.4]. Es sei hier bemerkt, dass Rousseau im Artikel *SON* des *Dictionnaire de Musique* – in Opposition zu Rameau – die Differenztöne als Repräsentanten der *Basse fondamentale* in Erwägung zieht. Bei der Überlagerung der Töne eines Durdreiklangs 4 : 5 : 6 entstehen nämlich als Differenztöne erster Ordnung der Fundamentalbass und seine Oktave (1 und 2). Bei *nicht ungestörter* Überlagerung wird der Fundamentalbass hörbar!

Um die Jahrhundertmitte haben Euler und Daniel Bernoulli mit dem Superpositionsprinzip hinreichend Erfahrung und diskutieren antizipierend die Gültigkeit des Theorems von Fourier (1814/26). Gleichzeitig nehmen sie wesentliche Argumente der Auseinandersetzung zwischen Ohm und Seebeck über die Definition des Tons vorweg. Die Frage ist: Kann jede periodische Schwingung als Superposition von Sinusschwingungen gedeutet werden? Bernoulli, der das annimmt, kommt dadurch zu einer Gleichsetzung von Ton und Sinusschwingung und sieht seine Ansicht im Phänomen der Obertöne bestätigt. Euler, der die Frage verneint, gibt ein Gegenbeispiel, das erst bei Kenntnis der Berechnungsmethode der Fourierkoeffizienten einer

spektralen Deutung unterzogen werden kann. Die Diskussion zeigt die Problematik mathematisch physikalischer Modellierung und ihrer ontologischen Implikationen. Die Bernoullische Vermutung entscheidet über das Wesen, den Realitätscharakter des Tons. Solange es Töne oder Klänge gibt, die nicht auf Sinusschwingungen reduziert werden können, kann die Sinusschwingung auch nicht als Ton schlechthin angesehen werden. Solange kann es aber auch keine allgemeingültige, auf Sinusschwingungen basierende spektrale Theorie der Klänge geben. Euler konzentriert sich aus diesem Grund auf eine Zeittheorie und deutet die Vokale nicht als Überlagerung von Sinustönen, sondern als verschiedene geometrische Schwingungsgestalten.

Bezüglich der Fundierung der Superposition bemerkt er, dass nicht nur sinusförmige sondern beliebige periodische Schwingungen Gestalt als Basis der Superposition dienen könnten. Superposition ist nur das Gesetz der Schallmischung, das sich als mathematische Summe deuten lässt.

Tartini kommt einer spektralen Deutung der Klangqualität sehr nahe, kümmert sich allerdings nicht um physikalische Details wie die physikalische Entsprechung zur Teiltonempfindung. Seine Überlegungen sind aus der Perspektive analytischer versus synthetischer Klangwahrnehmung bemerkenswert. Es ist aber denkbar, dass sie Rameaus *Nouveau Système* [1726] oder seiner *Génération harmonique* [1737] entliehen sind.

Ebenfalls um die Jahrhundertmitte verfasst Rousseau seine Artikel *TYMBRE* und *SON* für die *Encyclopédie* und gibt damit die älteste uns bekannte Definition von *tymbre* im Sinne einer allgemeinen Klangqualität [Kap. 3.1.11]. Rousseau charakterisiert einen Ton durch die drei Merkmale Tonhöhe, Lautstärke und *tymbre*, während Diderot zeitgleich die drei Merkmale Tonhöhe, Lautstärke und *isochronisme* postuliert. Diderot führt dadurch eine dynamische Qualität in die Diskussion des Tons ein, die in die Nähe zu modernem elektrotechnischen Denken gebracht werden kann [Kap. 3.1.10]. Der Begriff *Isochronisme* wird gewöhnlich in der Bedeutung von Periodizität gebraucht. In Diderots Verwendung des Begriffs hingegen scheint das Augenmerk auf die Abweichungen von der Periodizität gelegt, da sonst Isochronismus und Tonhöhe zu äquivalenten Begriffen würden.

Für die Definition des Tons ist ferner das zugrundeliegende Kommunikationsmodell bedeutsam. Die moderne Dreiteilung in Sender, Medium und Empfänger zeichnet sich in folgenden Stellen aus Handschriften von Taylor (wahrscheinlich nach 1712) ab:

A Musical Sound is when the Vibration is regular and uniform, the several strokes or pulses of the Air also following each other too swift to be distinguished by sense [Newton (?) in einer Hs. von Taylor, zitiert nach Cannon et al. 1981, 22]

[...] it must be observed that sound is produced by a vibrating or trembling motion of bodies which makes an undulation in the air, which affecting the organ of hearing is the cause of sound [Taylor, nach Cannon et al. 1981, 22]

Die Vorstellung findet sich wieder bei De Mairan [1737], Mattheson und Diderot [Kap. 3.1.9 und 3.1.10] und ist in der modernen Elektrotechnik und Kommunikationstheorie zum Standard geworden.

3.1.1. Sauveur: Knoten und Bäuche (1701)

Sauveur gibt keine explizite Definition des Tons. Aus der Beobachtung, dass eine Saite gleichzeitig mehrere Töne erklingen lässt, schliesst er auf die Notwendigkeit von zu den Teiltönen gehörenden Schwingungsknoten und -bäuchen.

En méditant sur les phénomènes des Sons, on me fit remarquer, que sur tout la nuit, on entendoit

Während ich über diese Dinge nachdachte, liess man mich bemerken, dass man, vor allem in der

dans les longues cordes, outre le Son principal, d'autres petits Sons qui étoient à la douzième & à la dix-septième de ce Son; que les Trompettes outre ces Sons-là en avoient d'autres, dont le nombre des vibrations étoit multiple du nombre de celle du Son fondamental. Je ne trouvai rien dans les explications des Trompettes marines qui me satisfît là-dessus. Mais en cherchant moi-même la cause de ce phénomène, je conclus que la corde outre les ondulation qu'elle faisoit dans toute sa longueur pour former le Son fondamental, se partageoit en deux, en trois, en quatre &c. ondulations égales qui formoient l'octave, la douzième, la quinzième de ce Son: je conclus ensuite la nécessité des nœuds & des ventres de ces ondulations, & la manière de les apercevoir au toucher & à la veuë comme je l'explique dans les Sons harmoniques. [Sauveur, 1701, 2–3]

Nacht, in den langen Saiten neben dem Hauptton weitere kleine Töne hört, die in der Duodezim und Septdezim dieses Tons stehen; dass die Trompeten neben diesen Tönen noch andere haben, deren Zahl von Schwingungen Vielfache der Zahl derjenigen des Haupttones sind. Ich fand in den Erklärungen der Nonnengeige nichts darüber, das mich zufrieden stellte. Aber indem ich selbst die Ursache dieser Erscheinung suchte, schloss ich, dass die Saite ausser den Schwingungen, die sie in ihrer ganzen Länge macht, um den Hauptton zu bilden, sich in zwei, in drei, in vier etc. zusätzliche Schwingungen teilt, welche die Oktave, Duodezim, Quintdezim dieses Tones bilden: Ich schloss ferner auf die Notwendigkeit der Knoten und Bäuche dieser Schwingungen und die Art, wie man sie mit dem Tast- und dem Gesichtssinn erkennen kann, wie ich in den harmonischen Tönen erkläre.

Ein *Knoten* ist eine Stelle der Saite, die sich während der Schwingung nicht bewegt. Die Stellen zwischen zwei Knoten begrenzen zusammen mit der Ruhelage zu jedem Zeitpunkt einen konvexen Bereich, sie bilden einen *Bauch*.

Knoten und Bäuche wären also ein notwendiges Kriterium für das Vorhandensein eines Teiltons. Kann aus der Bestimmung aller Knoten festgestellt werden, welche Teiltöne vorhanden sind? Aus den Knoten an den Stellen 0, $\frac{1}{2}$, 1 wäre etwa auf Grundton und Oktave, aus den Knoten an den Stellen 0, $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{3}$, $\frac{1}{2}$, $\frac{2}{3}$, $\frac{3}{4}$, 1 auf die Teiltöne 1, 2, 3 und 4 zu schliessen.

Die genannte Knotenmenge ergibt sich allerdings auch, wenn nur der dritte und vierte Teilton vorhanden sind. Das Kriterium ist damit nicht hinreichend.

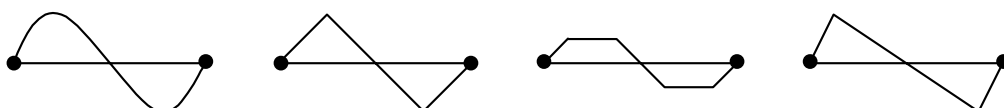
Sauveurs Formulierung lässt vermuten, dass er die Gleichzeitigkeit mehrerer Schwingungen nicht als mathematische Summe begreift. Wird nämlich die Überlagerung als mathematische Summe begriffen, so kann es bei der Überlagerung des Grundtons mit seiner Oktave neben den Endpunkten der Saite keine weiteren Knoten geben, denn der Mittelpunkt, der einzige Kandidat für einen Knoten, führt genau die Bewegung der Grundschiwingung aus.

Aus Anzahl und Verteilung der Knoten lässt sich, auch bei einem vagen Knotenbegriff, kein Kriterium zur Analyse zusammengesetzter Töne ableiten.

Die Knoten und Bäuche könnten auch als Ansatz verstanden werden, den Ton zu definieren. Sauveur vermeidet es, den gesamten Klang einer Saite als Ton zu bezeichnen. Nur seine Bestandteile sind Töne. Die Partialtöne wären dabei wie folgt zu charakterisieren:

Eine Saite lässt ausschliesslich den n -ten Teilton erklingen, falls die Stellen 0, $\frac{1}{n}$, $\frac{2}{n}$, ..., $\frac{n-1}{n}$, 1 die Schwingungsknoten sind und die Stellen dazwischen zu jedem Zeitpunkt konvexe und isomorphe Bäuche bilden.

Dies sind die Situationen, die Sauveur durch Auflegen der leichten Hindernisse erhält. Da über die Form der Bäuche nichts ausgesagt ist, könnten verschiedene Schwingungsformen die gleiche Tonhöhe ergeben:



Die Beispiele entsprächen demnach unzusammengesetzten Tönen. Sie sind Momentaufnahmen der Saitenauslenkung für den „zweiten Partialton“. Können sie vom Gehör unterschieden werden? [vgl. Koenig, Kap. 6.4]

Falls die Knoten nicht äquidistant verteilt sind oder falls die Saitenauslenkung zwischen zwei Knoten nicht konvex ist oder falls diese Formen nicht isomorph sind, kann kein isolierter Ton vorliegen. Doch welche Bestandteile kommen in welchem Mischungsverhältnis vor?

3.1.2. De la Hire: Eigenschwingungen des Stabes (1716)

Ausgehend von der Beobachtung, dass schwingende Stäbe je nach Anschlagstelle verschiedene Töne hervorbringen können, vermutet de la Hire in seinen beiden Aufsätzen in den *Memoires de l'Academie Royale* von 1716 eine örtliche Lokalisierbarkeit der Eigenfrequenzen:

On doit distinguer le Son qui se forme par la rencontre de deux corps sonores qui se choquent d'avec le ton qu'il a en le comparant à un autre ton de la même nature. Le Son d'un corps qui est choqué ne dépend point des vibrations du corps, comme on a remarqué pour les tons, mais seulement d'un fremissement des parties du corps, ce que M. Perrault avoit reconnu, & que j'ai confirmé ensuite dans ce qui j'en ai publié; & M. Carré qui avoit entrepris de traiter à fonds de la Musique, adopta aussi ce sentiment. [De la Hire 1716a, 262]

Man muss den Ton, der sich bildet, wenn zwei klingende Körper schlagend aufeinandertreffen, unterscheiden von demjenigen Ton den er hat, indem man ihn mit einem andern Ton der gleichen Art vergleicht. Der Ton [Klang] eines Körpers der geschlagen wird, hängt nicht von den Schwingungen des Körpers ab, wie man für die Tonhöhe bemerkt hat, sondern allein vom Zittern der Teile des Körpers, was Perrault erkannt hat und ich anschliessend durch das, was ich darüber publiziert habe, bestätigen konnte, und Carré der es unternommen hat, die Musik von Grund auf zu behandeln, hat diese Meinung übernommen.

Die Verwendung von *ton* als Synonym zu *Son* ist in „un autre ton de la même nature“ merkwürdig. Der sonstige Gebrauch ist klar im Sinne von Tonhöhe. Man könnte in obiger Übersetzung *Son* überall durch *Klang* und *ton* durch *Ton* ersetzen. Da diese Stelle jedoch keinen Hinweis auf eine allfällige Gleichzeitigkeit der im Körper möglichen Töne gibt, scheint *Ton* mit einer Ausnahme eine vetretbare Übersetzung für *Son*. In „Le Son d'un corps qui est choqué ne dépend point des vibrations du corps“ nämlich ergibt *Klang* einen anderen Sinn als *Ton*. Während *Ton* an die Grenze des inneren Widerspruchs führt, ergibt sich durch die Übersetzung *Klang* eine Deutung in Richtung Klangqualität: je nachdem wie die verschiedenen Teile zittern, ergibt sich unabhängig von der Grundtonhöhe ein anderer Klangeindruck.

Es geht de la Hire darum zu zeigen, dass dem Phänomen Tonhöhe durch Eigenschwingungen, die dem gesamten Körper entsprechen nicht beizukommen ist. Da beim schwingenden Stab die Anschlagstelle über die Tonhöhe entscheidet, nimmt er an, dass der betreffende Ton als Störung genau dort entsteht und sich über den restlichen Körper ausbreitet:

[...] pour peu qu'on touche un corps sonore avec un corps dur, quand le corps touché seroit d'une grandeur & d'une pesanteur presque immense, on entend aussi-tôt le son, & il me semble que ce Son ne peut venir que du fremissement du corps frappé, qui n'est autre chose que les particules de la matiere de ce corps, lesquelles étant dérangées par le choc dans l'endroit où il est touché, & communiquant leur ébranlement à toutes les parties du corps succesivement, font le fremissement & obligent l'air qui est renfermé

[...] sobald man einen klingenden Körper mit einem harten Körper auch nur berührt, falls der berührte Körper von ungeheurer Grösse und Gewicht ist, so hört man sofort den Ton, und es scheint mir, dass dieser Ton nur vom Zittern des angeschlagenen Körpers kommen kann. Das heisst, die Teilchen der Materie dieses Körpers, welche gestört durch den Schock am Ort, wo er berührt wird, und indem sie ihre Erschütterung sukzessive allen Teilen des Körpers mitteilen, bewirken das Zittern und zwingen die Luft, die in

dans ses pores d'en sortir, mais aussi-tôt ces pores se rétablissant & devenant même plus grands, reçoivent un nouvel air, & ce sont les frequentes secousses de cet air qui font une impression sur l'oreille & qui produisent le Son. [De la Hire 1716a, 267]

seinen Poren eingeschlossen ist, diese zu verlassen. Aber sobald diese Poren sich wiederherstellen und sogar noch grösser werden, erhalten sie eine neue Luft, und es sind die gehäuften Erschütterungen dieser Luft, die einen Eindruck aufs Gehör machen und die den Ton produzieren.

Die Schallgeschwindigkeit in festen Körpern ist wesentlich rascher als in der Luft (z.B. Eisen 5100 m/s). Die sofortige Hörbarkeit nach dem Anschlagen ist somit kein zwingendes Argument für eine lokale Tonerzeugung.

Cependant on ne peut pas nier que les vibrations du corps d'où naissent des ondulations, ne produisent un mouvement dans l'air qui est renfermé dans les pores du corps, mais ce mouvement est si lent par rapport à celui qui fait le Son, comme je l'ai montré, que l'oreille ne sçauroit l'appercevoir, mais ce mouvement se mêlant avec celui du freuissement, produit differents Sons dans les corps choqués, ensortes qu'on peut dire, à ce qu'il me semble, que les vibrations déterminent le ton du Son qui est formé par le freuissement, ainsi les differentes vibrations ou ondulations des corps sonores font les differents tons de leur Son, & même cela arrive dans le même corps, comme les experiences que j'ai rapportées ci-devant nous l'ont fait connoître. C'est aussi pourquoi lorsque dans un corps le mouvement des vibrations peut s'accorder avec celui du freuissement, on entend un Son distinct & qui fera une consonance avec un autre Son du même corps choqué d'une maniere differente de la précédente, si le freuissement est le même; car si les vibrations en sont differentes, & qu'elles ayent un rapport prochain de l'une à l'autre comme de 1 à 2, de 2 à 3, &c. le freuissement s'accordera avec ces vibrations, & produira une consonance. On doit aussi remarquer | que quand même les vibrations du corps ne s'accorderoient pas exactement avec les freuissements, la consonance ne laisseroit pas de paroître, car le mouvement composé des deux s'y accorderoit, comme je l'ai remarqué sur ce que j'ai donné sur les tons de la corde de la Trompette marine. Ces considerations pourront nous conduire à l'explication de l'amortissement du Son produit dans un corps long & sonore, quand il est choqué dans un certain endroit. [De la Hire 1716a, 268]

Indessen kann man nicht leugnen, dass die Vibrationen des Körpers, wodurch Schwingungen [Wellen?] entstehen, eine Bewegung in der Luft, die in den Poren eingeschlossen ist, verursachen. Aber diese Bewegung ist so langsam im Vergleich zu derjenigen, die den Ton verursacht, dass das Gehör sie, wie ich gezeigt habe, nicht wahrnehmen kann, aber indem sich diese Bewegung mit derjenigen des Zitterns mischt, entstehen im angeschlagenen Körper verschiedene Töne, derart dass man, wie mir scheint, sagen kann, dass die Vibrationen oder Schwingungen die Höhe des Tons bestimmen, der durch das Zittern gebildet wird, so bewirken die verschiedenen Vibrationen oder Schwingungen der klingenden Körper die verschiedene Höhe ihres Tons, und das kann sogar im gleichen Körper vorkommen, wie uns die Experimente, von denen ich vorher berichtet habe, zeigen. Deshalb hört man auch einen verschiedenen Ton, sobald sich in einem Körper die Bewegung der Vibrationen auf diejenige des Zitterns abstimmen kann, und dieser bildet eine Konsonanz zu einem andern Ton desselben Körpers, der auf eine andere von der vorangehenden verschiedene Art angeschlagen wird, wenn das Zittern das gleiche ist; denn wenn die Vibrationen verschieden sind und unter sich ein nahes Verhältnis wie 1 : 2, 2 : 3, etc. haben, stimmt sich das Zittern auf diese Vibrationen ab, und produziert eine Konsonanz. Es ist auch zu bemerken, dass die Konsonanz nicht erscheinen kann, wenn die Vibrationen der Körper nicht genau mit den Erzitterungen übereinstimmen, denn die zusammengesetzte Bewegung der beiden stimmen bei ihr überein, wie ich festgestellt habe, bei dem was ich über die Nonnengeige vorgebracht habe. Diese Überlegungen könnten uns zu einer Erklärung des Absterbens des Tons in einem langen, klingenden Körper führen, wenn er an einer bestimmten Stelle angeschlagen wird.

De la Hire nimmt offenbar einen rückgekoppelten Vorgang der Klangentstehung an. Wenn die Teilchen aufgefasst als Mikrooszillatoren in einem multiplen Frequenzverhältnis zur Grundfrequenz des Körpers stehen, entsteht ein Ton. Geringfügige Abweichungen von der exakten Proportion führen zu starker Dämpfung („amortissement“) des betreffenden Tons. Das Ergebnis der Rückkoppelung der beiden Vibrationen besteht somit aus einem oder mehreren über den Körper verteilten harmonischen Obertönen zur Grundfrequenz.

Thematisch handeln die zitierten Abschnitte also von der Menge der Eigenfrequenzen des schwingenden Stabes. Wie Daniel Bernoulli 1742 nachweist, sind diese im schwingenden Stab nicht ganzzahlige Vielfache einer Grundfrequenz.

Der Ansatz von de la Hire könnte als Begründung für eine naturgesetzmässige Ausbildung harmonischer Teiltönspektren verstanden werden. Der Vergleich mit der Nonnengeige ist einerseits vorschnell – die wirklichen Frequenzverhältnisse sind nicht dieselben –, andererseits lassen sich die Konzepte Knoten und Bäuche von der eindimensionalen gespannten Saite auf dreidimensionale, schwingende Körper übertragen, was die Visualisierung der Schwingungsmoden mittels der Chladni'schen Klangfiguren erlaubt.

Ebenso wenig wie Sauveur im Falle der Teiltöne der Saite gibt de la Hire einen Hinweis drauf, wie sich die Simultaneität mehrerer Teiltöne auf die Bewegung des klingenden Körpers auswirken könnte. Gleichzeitiges Anschlagen des Stabes an verschiedenen Stellen ergibt zwei Störungen, die sich beide über den Körper ausbreiten. Was für eine Bewegung führt ein Teilchen im Wirkungsbereich beider Störungen aus, falls die beiden erzeugten Töne unterschiedliche Frequenz haben? Es ist offen zu lassen, ob mit „ainsi les differentes vibrations ou ondulations des corps sonores font les differents tons de leur Son, & même cela arrive dans le même corps“ daran gedacht wird, dass die verschiedenen Schwingungen auch simultan auftreten könnten.

3.1.3. Rameau: Corps sonore und Son fondamental

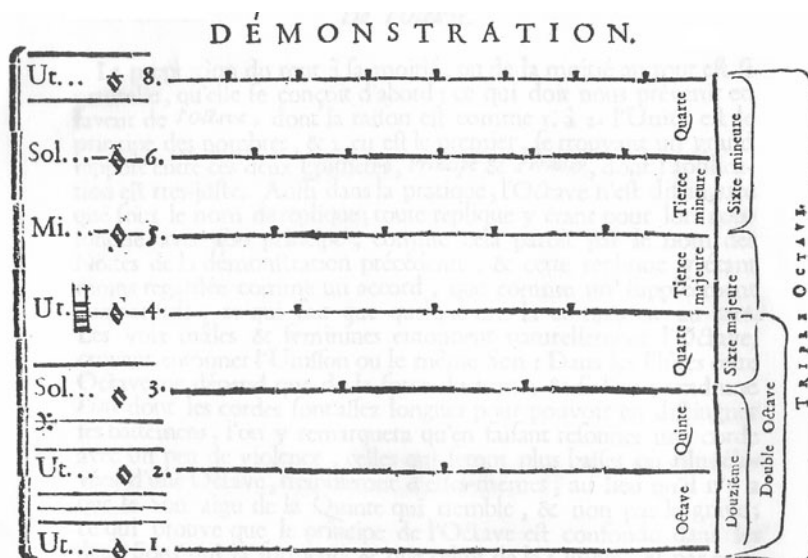
In den theoretischen Schriften Rameaus zur Fundierung seines harmonischen Systems spielen die Begriffe *Son fondamental*, *engendrer* und *sous-entendre* eine zentrale Rolle. Sie erfahren zwischen dem *Traité de l'harmonie réduite à ses principes naturels* [1722], dem *Nouveau Système de musique théorique* [1726] und der *Génération harmonique* [1737] eine Umdeutung. Die Erzeugung der Konsonanzen durch das traditionelle Verfahren der Saitenteilung weicht einer physikalischen Deutung der Erzeugung der Obertöne aus dem Grundton eines klingenden Körpers. Der klingende Körper als Träger des *Son fondamental* und seiner real erzeugten Obertöne enthält in sich die Gesetze der Harmonie vorgezeichnet. Er wird dadurch zur zentralen Instanz der Harmonielehre. Dies relativierend weist die in der *Génération harmonique* von de Mairan übernommene Theorie zur Koexistenz verschiedener Schwingungen in der Luft in Rameaus Adaption dem Übertragungsmedium eine aktive Rolle bei der Entstehung der Obertöne zu.

Traité de l'harmonie (1722)

Im *Traité de l'harmonie* werden die Obertöne nicht erwähnt. Er ist der Proportionenlehre verpflichtet und setzt sich auf kritische Weise mit Zarlino und Descartes auseinander.

Die Verhältnisse der Töne untereinander werden auf verschiedene Weise manifest, in der Saitenteilung am Monochord, in den Schwingungszahlen, in den Spannungen, in der Dicke der Saite, in den letzteren beiden in quadrierter Form.

Die Herleitung der Konsonanzen geht von sieben im Einklang stehenden gleich langen Saiten aus, von denen sechs durch mobile Stege in 2, 3, 4, 5, 6 beziehungsweise 8 aliquote Teile geteilt sind:



[Quelle: Rameau 1722, 4]

Das heisst Zarlinos Senario wird um die dreifache Oktave 8 erweitert. Die im System fehlende Zahl 7 wird mit Verweis auf ihre Unbrauchbarkeit zur Konsonanzbildung ausgeschlossen. Die ungeteilte Saite 1 ist die Referenzgrösse, die Einheit oder das Prinzip aller (natürlicher) Zahlen und die multiplen Proportionen gelten als durch die Saitenteilung generiert:

Nous devons supposer d'abord que la corde entiere qui répond à 1. rend un certain Son, dont il faut examiner les proprietéz, en les faisant rapporter à celles de cette corde unique, ou même à celles de l'Unité qui est le principe de tous les nombres.

1°. Les differentes divisions marquées sur toutes les cordes, & déterminées par la quantité que contient chaque nombre qui leur répond, nous prouvent evidemment que chaque partie de ces cordes provient de la premiere, puisque ces parties sont continuës dans cette corde premiere & unique; donc les Sons que doivent rendre ces cordes divisées, sont engendrez du premier Son, qui en est par consequent le principe & le fondement.

2°. Des differentes distances qui se trouvent entre ce Son fondamental & ceux qu'il engendre par sa division, il se forment differents intervalles, dont par consequent ce Son fondamental est le principe.

3°. Et finalement, de l'union de ces differentes intervalles, il se forme differentes Consonances, dont l'Harmonie ne peut être parfaite, si ce premier Son ne regne au dessous d'eux, comme en étant la *Base* & le *Fondement*, selon ce qui paroît dans la *Démonstration*; donc ce premier Son est encore le principe de ces Consonances & de l'Harmonie qu'elles forment. [Rameau 1722, 5]

Wir gehen zunächst davon aus, dass die ganze Saite, welche 1 entspricht, einen gewissen Ton gibt, dessen Eigenschaften zu untersuchen sind, indem man sie auf diejenigen dieser einzelnen Saite bezieht oder auf diejenige der Einheit, die das Prinzip aller Zahlen ist.

1°. Die verschiedenen Unterteilungen, die auf allen Saiten markiert sind und die durch die Anzahl bestimmt sind, die jede Zahl enthält, zeigen uns klar, dass jeder Teil dieser Saiten von der ersten herkommt, weil diese Teile in dieser ersten und ungeteilten Saite enthalten sind; die Töne, welche diese geteilten Saiten hervorbringen, sind also vom ersten Ton erzeugt, der folglich für sie das Prinzip und Fundament ist.

2°. Aus den verschiedenen Distanzen, die sich zwischen diesem fundamentalen Ton und denjenigen, die er durch seine Teilung erzeugt, werden verschiedene Intervalle gebildet, von denen folglich der fundamentale Ton das Prinzip ist.

3°. Und schliesslich werden aus der Vereinigung dieser verschiedenen Intervalle verschiedene Konsonanzen gebildet, deren Harmonie nicht vollkommen sein kann, wenn nicht dieser erste Ton unterhalb von ihnen regiert, indem er ihre Basis und ihr Fundament ist; dieser erste Ton ist also auch das Prinzip der Konsonanzen und der Harmonie, die sie bilden.

Die Menge der Konsonanzen ergibt sich als Menge der im Zusammenklang der sieben unterschiedlich geteilten Saiten vorkommenden Intervalle.

Für Rameaus System zentral ist die Sonderrolle der Oktave. Zum einen postuliert er eine Oktavinvarianz, wonach Intervalle, die sich in ihrer Grösse um eine oder mehrere Oktaven unterscheiden, als identisch im Charakter anzusehen sind. Dies erlaubt ihm, sich auf Intervalle, die innerhalb der Oktave liegen, zu beschränken. Zum anderen werden auch die sich zur Oktave ergänzenden Intervalle gesondert betrachtet, sie sind in seinem System entweder beide konsonant oder beide dissonant.

Die Begründung für die Sonderstellung der Oktave verlässt, ähnlich wie in Descartes' *Compendium* [vgl. Kap. 2.4.3], die rein zahlentheoretische Betrachtungsweise:

La proportion du tout à sa moitié, ou de la moitié au tout est si naturelle, qu'elle se conçoit d'abord; ce qui doit nous prévenir en faveur de l'*Octave*, dont la raison est comme 1. à 2. L'unité est le principe des nombres, & 2. en est le premier, se trouvant un grand rapport entre ces deux Epithetes, *Principe & Premier*, dont l'application est tres-juste. Aussi dans la pratique, l'*Octave* n'est distinguée que sous le nom de replique; toute replique y étant pour lors confondue avec son principe, comme cela paroît par le nom des Notes de la demonstration précédente; & cette replique y étant moins regardée comme un accord, que comme un supplément aux accords; ce qui fait que quelque-uns la comparent au *zero*. Les voix mâles & féminines entonnent naturellement l'*Octave*, croyant entonner l'Unisson ou le même Son: Dans le Flûtes cette Octave ne dépend que de la force du vent; & si l'on prend une *Viole* dont les cordes sont assez longues pour pouvoir en distinguer les battements, l'on y remarquera qu'en faisant resonner une corde avec un peu de violence, celles qui seront plus bassées ou plus élevées d'une Octave, trembleront d'elles mêmes, au lieu qu'il n'y a que le Son aigu de la Quinte qui tremble, & non pas le grave; ce qui prouve que le principe de l'*Octave* est confondu dans les deux Sons qui la forment, & que celui de la Quinte, & par consequent de tous les autres intervals, reside uniquement dans le Son grave & fondamental. * Descartes s'étant trompé icy par la fausse preuve qu'il tire d'un Luth, à l'égard de l'*Octave*. [Rameau 1722, 6]

* [Hinweis auf Descartes 1650, 59]

Das Verhältnis des Ganzen zu seiner Hälfte oder der Hälfte zum Ganzen ist derart natürlich, dass es zuallererst begriffen wird; was uns für die *Oktave* voreinnimmt, deren Verhältnis wie 1 zu 2 ist. Die Einheit ist das Prinzip der Zahlen und 2 ist die erste von ihnen; es besteht also eine enge Beziehung zwischen den beiden Attributen, *Prinzip* und *Erste*, deren Anwendung sehr treffend ist. Auch in der Praxis wird die Oktave nur unter der Bezeichnung Replik unterschieden; jede Replik wird dabei mit seinem Prinzip verwechselt, wie die Bezeichnung der Noten der vorangehenden Demonstration zeigt; und diese Replik wird dabei weniger als ein Akkord, sondern vielmehr als Ergänzung zu den Akkorden angesehen; was bewirkt dass einige sie mit der *Null* vergleichen. Die männlichen und weiblichen Stimmen intonieren natürlicherweise die Oktave und glauben den Einklang oder gleichen Ton zu intonieren: Bei den Flöten hängt diese Oktave nur von der Anblasstärke ab, und wenn man eine *Viola* nimmt, deren Saiten genug lang sind, um die Schwingungen unterscheiden zu können, bemerkt man sie, indem man die Saite ein wenig heftig erklingen lässt: diejenigen die eine Oktave tiefer oder höher sind, erzittern von selbst, während bei der Quinte nur der hohe Ton [mit-]zittert und nicht der tiefe; was beweist, dass das Prinzip der Oktave in den beiden Tönen, die sie bilden, eingeschmolzen ist und dass dasjenige der Quinte und folglich aller anderen Intervalle allein im tiefen und fundamentalen Ton liegt. Descartes hat sich hier getäuscht mit dem falschen Schluss, den er hinsichtlich der Oktave aus der Laute zieht.

Die zahlentheoretische Überlegung ist verwandt mit derjenigen von Brossard [1707] im Artikel *UNISSON*. Die Oktave kann bei der behaupteten Invarianz tatsächlich mit der Null verglichen werden, allerdings nur in der additiven Sicht des Intervalladdierens. Null ist das additive Neutralelement der Addition:

$$I + n \cdot \text{Oktave} \equiv I + n \cdot 0 = I + 0 = I, \text{ für alle Intervalle } I \text{ und ganze Zahlen } n.$$

Musikalische Intervalle addieren korrespondiert mit der Multiplikation der Proportionen. Das neutrale Element der Multiplikation ist aber die Eins, 2 ist also mit 1 zu identifizieren:

$$q \cdot 2^n \equiv q \cdot 1^n = q \cdot 1 = q, \text{ für alle Proportionen } q = \frac{r}{s} \text{ und ganze Zahlen } n.$$

Begründet wird diese Reduktion wahrnehmungspsychologisch als Folge einer „natürlichen“ Verwechslung, instrumenten-akustisch durch den Überblaseffekt bei der Flöte und im engeren Sinn physikalisch mit an Saiten beobachteten Resonanzerscheinungen. In der Letzteren ist Rameaus Beweisführung zirkulär und nicht stichhaltig. Ebenso wenig ist seine Widerlegung Descartes' korrekt. Offenbar vergleicht er die Oktave nur mit Intervallen, die innerhalb einer Oktave liegen, setzt also die behauptete Invarianz bereits voraus. Das Mitschwingen der tieferen Saite ist grundsätzlich bei allen multiplen Proportionen $1 : n$ möglich, also auch bei der Duodezim. Zum Erklängen kommt dabei aber ein Ton mit der Frequenz des anregenden Tons (bezogen auf die angeregte Saite der n -te Partialton und Vielfache davon) und nicht der Hauptton der tieferen Saite. Ferner sind auch Überblaseffekte in die Duodezim möglich. Es bleibt also zu fragen, weshalb die Musiktheorie mit analoger physikalistischer Begründung keine Duodezimidentität postuliert. Im *Nouveau Système* hingegen – unter Kenntnis des Obertonphänomens – behauptet Rameau nicht nur das Mitschwingen, sondern auch das Mitklängen der tieferen Duodezim und entzieht dabei selbst seiner physikalischen Begründung der Oktavinvarianz die Grundlagen. Rameaus Wissensstand im *Traité de l'harmonie* entspricht demjenigen von Descartes im *Compendium*. Durch seine ungenaue Interpretation der Resonanzerscheinung zur Rechtfertigung der Sonderrolle der Oktave, ist er aber vom Wissen um die Obertöne eher weiter entfernt.

Nouveau Système de musique théorique (1726)

Im ersten Kapitel „Faits d' Experience qui servent de principe à ce Système“ seines *Nouveau Système de musique théorique* von 1726 bespricht Rameau mit Verweis auf Mersenne und Sauveur das Obertonphänomen. Er sieht in der Erfahrung der Obertonreihe das Prinzip zur Legitimation der Konsonanz des Durdreiklangs und der Harmonielehre überhaupt. Die im *Traité de l'harmonie* verwendete Versuchsanordnung aus mehreren unterschiedlich geteilten Saiten kann durch eine einzige Saite ersetzt werden. Die Töne der verschiedenen Schallquellen sind nämlich im Klang einer Saite bereits enthalten. Das künstliche Vorgehen der Saitenteilung zur Gewinnung der Konsonanzen erweist sich als Imitation, denn die Konsonanzen sind auf natürliche Weise schon im Ton einer einzigen Saite vorgezeichnet.

Une seule Corde fait résonner tout l'ensemble des consonances, entre lesquelles on distingue principalement la Douzième & la Dix-septième majeure*; comme toute personne capable de discerner ces Consonances pourra s'en assurer, en pinçant l'une des plus basses Cordes d'un Clavecin, ou en raclant la plus grosse Corde d'un Violoncello. Ainsi nous croyons pouvoir proposer cette Experience comme un fait qui nous servira de principe pour établir toutes nos Consequences.
[*Verweis auf Mersenne, Livre 4, Des instrumens, 204; Sauveur 1701, 299, 313]
[Rameau 1726, 17]

Eine einzige Saite bringt alle Konsonanzen zum Mitklängen, unter welchen man hauptsächlich die Duodezim und die grosse Septdezim unterscheidet; wie sich jede Person, die fähig ist, diese Konsonanzen zu unterscheiden, durch Zupfen einer der tiefsten Saiten eines Cembalos oder durch Streichen der dicksten Saite eines Cellos versichern kann. So glauben wir diese Erfahrung als eine Tatsache vorzuschlagen, die uns als Prinzip dienen wird, um alle unsere Folgerungen zu begründen.

Nicht nur bei Saiten, auch bei anderen klingenden Körpern kann das gleiche Phänomen beobachtet werden:

On distinguera les mêmes Consonances sur l'Orgue dans un des gros Tuyaux de Bourdon; & en soufflant même dans l'un de ces Tuyaux, on y entendra au moins la Douzième presque aussi distinctement que le Son dominant. [Rameau 1726, 17]

Man unterscheidet die gleichen Konsonanzen auch auf der Orgel in einer der dicken Bordunpfeifen; und wenn man in eine dieser Pfeifen bläst, hört man sogar die Duodezim fast ebenso deutlich wie den Hauptton.

Im Unterschied zu den Saiten ist also bei diesen Orgelpfeifen der dritte Teiltton besonders ausgeprägt. Ein allfälliger Zusammenhang mit der unterschiedlichen Klangqualität wird dabei nicht gesehen oder nicht der Erwähnung Wert gefunden. Die bewusste Wahrnehmung der Teiltöne ist vor allem eine Funktion der Lenkung der Aufmerksamkeit:

Ces mêmes Consonances se distinguent encore dans les Tymbales, dans le Son le plus grave d'une Trompette, dans les Cloches, &c. pourvû qu'on done pour lors toute son attention aux ondulations qui forment une espece de murmure dans l'Air, immédiatement après le Son dominant de l'Instrument propre à cet effet, sans occuper pour lors de ce Son dominant, ny sans y être distrait par aucun bruit étranger; mais en imaginant en soi-même la Quinte ou la Tiercemajeure de ce Son dominant, pour disposer l'oreille à sentir ces Consonances dans leurs Unissons ou dans leur Octaves, dont l'Air retentira; ce qui est plus facile à distinguer dans les Cloches, parce que le Son en est plus éclatant, supposé d'ailleur qu'il soit net & distinctement déterminé. Au reste, si l'on n'y entend d'abord que la *Quinte* ou la *Tierce majeure*, il n'y aura qu'à imaginer ensuite la Consonance qu'on n'aura pas entenduë, bien tôt elle viendra frapper le timpan de l'oreille, & bien-tôt après ces deux Consonances le frapperont également ensemble. [Rameau 1726, 17]

Diese gleichen Konsonanzen lassen sich auch in den Zymbeln, im tiefsten Ton einer Trompete, in den Glocken etc. unterscheiden, vorausgesetzt, dass man dabei die ganze Aufmerksamkeit auf die Schwingungen lenkt, die in der Luft eine Art Gemurmel bilden, unmittelbar nach dem vorherrschenden Ton des für diesen Effekt geeigneten Instruments, ohne sich dabei um diesen Hauptton zu kümmern und ohne sich von irgendwelchen fremden Geräuschen ablenken zu lassen; aber indem man sich innerlich die Quinte oder grosse Terz vorstellt, um das Ohr darauf vorzubereiten, diese Konsonanzen in ihren Einklängen oder Oktaven zu hören, von welchen die Luft erschallt; was bei den Glocken einfacher zu unterscheiden ist, weil ihr Ton heller ist, vorausgesetzt ferner, dass er sauber und klar bestimmt ist. Im Übrigen, wenn man zunächst nur die Quinte oder die grosse Terz hört, muss man sich anschliessend nur die Konsonanz, die man nicht hört, vorstellen, und schon schlägt sie das Trommelfell und gleich darauf schlagen es diese beiden Konsonanzen auch gemeinsam an.

Falls *immédiatement après* rein zeitlich ausgelegt wird, könnte aus der Stelle ein asynchroner Einsatz der Partialtöne herausgelesen werden. Das Gemurmel der Obertöne setzt erst nach dem Hauptton – es wird von diesem erzeugt – ein. Das Ende der zitierten Stelle lässt aber an dieser Interpretation zweifeln, denn *bien-tôt après* ist dort eine Funktion der Aufmerksamkeitslenkung. Dass das Trommelfell erst nach der bewussten Fokussierung auf die Teiltöne durch diese auch angeregt wird, suggeriert sogar eine Wechselwirkung zwischen Bewusstsein und Trommelfell. Die nicht wahrgenommenen Teiltöne würden demnach bereits auf dem Trommelfell ausgefiltert. Das Trommelfell als Kontaktstelle zur Aussenwelt dient Rameau als Metapher für den Hörvorgang.

Am Beispiel der Glocke argumentiert er mit Begriffen der Klangcharakterisierung: Weil der Ton der Glocke im Vergleich zu anderen Instrumenten *plus éclatant* ist, können die Teiltöne darin leichter unterschieden werden, falls ihr Ton *net & distinctement déterminé* ist. *éclatant* heisst also höhere Partialtöne haben eine verhältnismässig grosse Stärke und *net & distinctement déterminé* könnte als frei von inharmonischen Bestandteilen in die Sprache der Klangspektren übertragen werden.

Neben der Ablenkung der Aufmerksamkeit durch den Hauptton, der in seiner Stärke dominiert, verhindert ferner die Einheit in der Kombination der Teiltöne, dass diese gewöhnlich gesondert wahrgenommen werden:

La préoccupation où nous tient naturellement le Son donné, dont la résonance domine extrêmement sur celle des petits Sons qui l'accompagnent; & d'ailleurs, la grande union qui se trouve dans le tout ensemble, empêchent souvent d'y distinguer les Consonances en question: mais cela ne prouve pas qu'on ne puisse les y distinguer, quand on y donne toute l'attention nécessaire, & quand on a d'ailleurs l'oreille assez

Die Aufmerksamkeit, die uns gewöhnlich denjenigen gegebenen Ton vorhält, dessen Resonanz über diejenigen der kleinen ihn begleitenden Töne stark dominiert sowie die grosse Einheit, die sich in der Gesamtkombination findet, verhindert gewöhnlich die Unterscheidung der betreffenden Konsonanzen: dies beweist aber nicht, dass man sie nicht unterscheiden könnte, wenn man ihnen die ganze erforderliche

fine pour en juger. [Rameau 1726, 18]

Aufmerksamkeit schenkt und wenn man zudem ein genügend feines Gehör hat, um darüber zu urteilen.

Eine Ursache für diese Einheit des Klangs der Teiltöne gibt Rameau nicht. Es scheint aber naheliegend, dass er von einem impliziten Zusammenhang zwischen Konsonanz und Verschmelzung ausgeht.

Das Phänomen der Obertöne kann nach Rameaus Auffassung nicht als Vorurteil oder Täuschung abgetan werden. Die Obertöne entstehen also nicht erst auf dem Trommelfell als Folge einer Interaktion mit dem Bewusstsein. Um dies zu beweisen, führt er das Beispiel der Klangsynthese bei der Orgel an, bei der die Partialtöne durch die Registrierung in verschiedenen Pfeifen real vorhanden sind. Dennoch scheint man nur den Hauptton zu hören:

Les personnes qui voudroient traiter ceci de préjugé, pourront s'apercevoir, en attendant qu'elles soient revenus du leur, qu'une seule Touche de l'Orgue, par le moyen de laquelle on fait résonner en mêmes temps toutes les Consonances, semble néanmoins ne fournir à l'oreille qu'un seul Son, qui est toujours le plus grave & le plus dominant. Or s'il est possible de cacher ainsi l'art par l'art, que ne doit-on pas présumer des effets naturels que ce double art représente? D'ailleurs dès qu'un pareil effet est sensible dans un corps sonore, on ne peut se dispenser de l'attribuer à tous les corps sonores; avec cette seule différence que l'effet peut être plus sensible dans un corps que dans un autre. [Rameau 1726, 18]

Die Leute, die dies als Vorurteil abtun möchten, könnten, bis sie davon abgekommen sind, bemerken, dass eine einzige Orgeltaste, mit Hilfe derer man gleichzeitig alle [diese] Konsonanzen zum Mitklingen bringt, nichts desto weniger dem Ohr nur einen einzigen Ton zu übermitteln scheint, der immer der tiefste und am stärksten dominierende ist. Und wenn es möglich ist, auf diese Weise die Kunst mittels Kunst zu verdecken, was muss man nicht alles über die natürlichen Effekte vermuten, die diese doppelte Kunst darstellt. Sobald ausserdem ein derartiger Effekt in einem klingenden Körper wahrnehmbar ist, kann man nicht anders, als ihn allen klingenden Körpern zuzuschreiben, mit dem einzigen Unterschied, dass der Effekt in einem Körper eher wahrnehmbar ist als in einem anderen.

War vorhin von *Verschmelzung* die Rede, so scheint hier ein weiterer psychoakustischer Begriff, die *Verdeckung*, auf. Die Kunst – der Orgelklang – verbirgt dabei ihre Vielheit mit künstlichen Mitteln, durch Registrierung und Einstimmung der Pfeifen, und imitiert die Einheit der Natur – den Ton. Werden die Obertöne durch den Grundton verdeckt, so sind sie für die wahrnehmende Person wie nicht vorhanden. Der psychoakustische Verdeckungsbegriff bezieht sich auf sensorisch ununterscheidbare, im Spektrum aber verschiedene Signalen. Verschmelzung dagegen bedeutet die Überlagerung mehrerer Töne zu einer neuen Einheit, chemisch gesprochen die Verbindung von Atomen oder Molekülen zu einem neuen Molekül mit neuen Eigenschaften. Die beiden Aspekte Verdeckung und Verschmelzung ergeben je nach Gewichtung einen unterschiedlichen Einfluss des Spektrums auf die Klangqualität der Synthese. Das Beispiel der Klangsynthese an der Orgel wird in der *Génération harmonique* ausführlicher dargelegt [s.u.], und es ist kaum anzunehmen, dass Rameau der Zusammenhang zwischen Registrierung und Klangqualität unbekannt war. Übergangslos schliesst er von einer einzelnen akzeptierten Beobachtung der Obertöne auf alle klingenden Körper. Das System der Obertöne als ganzzahlige Frequenzvielfache ist in allen klingenden Körpern vorhanden, aber nicht in allen gleich gut wahrnehmbar. Jeder klingende Körper repräsentiert dadurch die natürliche Grundlage der Harmonie. Diese grobe Verallgemeinerung ist nur unter der Definition des klingenden Körpers als Schallquelle von periodischem Schall mit dominierender Grundfrequenz haltbar. Glocken erfüllen dieses Kriterium nicht. An dieser Stelle knüpft Chladnis Kritik an Rameaus Auffassung an [vgl. Kap. 3.4.1]. Die Teiltonverhältnisse bei klingenden Stäben, Platten und Membranen, ja sogar bei realen Saiten, fallen nicht unter Rameaus Begriff des *Corps sonore*! Sie sind keine wahren Nachahmungen der Natur. Nicht sauber gearbeitete Glocken bringen die Idee des *Corps sonore* nur unvollkommen zum Ausdruck. Rameau sähe vermutlich in Chladnis

Beobachtungen keinen Einwand gegen seine Auffassung, der feine Unterschied zwischen *tous les corps sonores* und *corps sonore* als Träger einer idealen Obertonreihe ist aber nicht zu übersehen.

Auf die Problematik der Legitimation des Molldreiklangs, der nicht von der Obertonreihe seines Grundtons abgeleitet werden kann, soll hier nur kurz eingegangen werden. Sie beruht auf Rameaus Einteilung der Konsonanzen in direkte und indirekte. Die indirekten Konsonanzen sind die Oktavergänzungen der direkten. Die direkten sind die Quinte mit ihrem Oktaväquivalent 3 und die grosse Terz mit ihrem Oktaväquivalent 5. Aus unerfindlichen Gründen wird auch die kleine Terz als Quintergänzung der grossen zu den direkten Konsonanzen gerechnet, woraus sich zwei die Formen des „vollkommenen Dreiklangs“ (*accord parfait*) ergeben. [Nouveau Système, 21] Die Herleitung der Konsonanz des Molldreiklangs ist innerhalb der Proportionenlehre ohne Referenz auf die Obertonreihe weniger problematisch. Rameaus Herleitung der musikalischen Harmonien steht im Spannungsfeld zwischen der Instanz Obertonreihe als Naturgesetz und einem allgemeinen Terzschichtungsprinzip ohne Rücksicht auf Obertonverhältnisse über einem gesetzten Grundton.

Génération harmonique (1737)

Von der Kenntnis klanglicher Phänomene her gesehen, geht die *Génération harmonique* nur unwesentlich über das *Nouveau Système* hinaus, auch erhält Rameaus harmonisches System keine neuartigen Elemente. Das in den beiden andern Schriften wenig strukturierte physikalische Einleitungskapitel wird nun in wissenschaftlicher Manier in zwölf Propositionen, sieben Experimente und in Schlussfolgerungen eingeteilt und ist wesentlich umfangreicher. Neu ist eine physikalische Theorie, die de Mairans Erklärung der Superposition von Tönen in der Luft mit dem Obertonphänomen in Verbindung bringt. Hinzugekommen ist auch ein kurzer Absatz, der das Ohr als Resonanzsystem deutet. Die Betrachtungsweise ist eine physikalische, was die Entsehung der Obertonreihe anbelangt, und eine psychologische in Bezug auf die korrespondierende Tonwahrnehmung. Rameau selbst sieht seine Entwicklung in den drei hier diskutierten Schriften wie folgt:

C'étoit déjà beaucoup pour moi d'avoir découvert cette Basse fondamentale, telle que je l'annonce dans mon *Traité de l'Harmonie*; on peut dire que c'est le plus pur raïon d'une lumière, dont, à la vérité, la source m'étoit encotre inconnue; j'ai commence à l'entrevoir, cette source, dans mon nouveau Système, & je crois maintenant la toucher de près.
L'expérience m'a d'abord fait sentir ce principe, je l'ai reconnue ensuite dans le Son qui naît de la totalité d'un Corps sonore, & avec lequel résonnent en même tems son Octave, sa Quinte, & sa Tierce majeure; de sorte qu'il ne s'agit plus que d'en découvrir la cause; & pour cet effet, j'ai adopté une Hypothese qui m'a paru très Féconde, & très-lumineuse, dont on trouvera l'énoncé dans le premier Chapitre de cet Ouvrage. [Rameau 1737, Preface (9)]

Es war schon viel für mich, das Gesetz dieses Fundamentalbasses aufgedeckt zu haben, so wie ich es in meinem *Traité de l'Harmonie* darlege; man kann sagen, das dies der reinste Lichtstrahl ist, von welchem mir allerdings die Quelle unbekannt war; ich habe in meinem nouveau Système begonnen, diese Quelle zu ahnen und glaube sie nun von nahe zu erfassen.
Die Erfahrung hat mich zuerst dieses Prinzip spüren lassen, ich habe es anschliessend im Ton, der aus der Ganzheit des klingenden Körpers hervorgeht und mit dem gleichzeitig seine Oktave, seine Quinte und seine grosse Terz mitklingen, erkannt; so dass es nur noch darum geht, davon die Ursache zu entdecken; und zu diesem Zweck habe ich eine Hypothese übernommen, die mir sehr fruchtbar und sehr erhellend vorkommt, deren Aussage man im ersten Kapitel dieses Werks findet.

Im Unterschied zu früheren Versuchen, die Musik zu fundieren, leiste der gewählte Weg eine Begründung von innen heraus und sei nicht von aussen an die Sache herangetragen:

J'ai reconnu pour lors que tous les principes sur lesquels on avoit prétendu fonder la Musique, soit chez les Anciens, soit chez les Modernes, naissoient au contraire de la chose même, c'est-à-dire, de l'Harmonie qui résulte de la résonnance d'un Corps sonore; [...]. [Rameau 1737, Preface (10, Sp. 1)]

Ich habe dabei erkannt, dass alle Prinzipien, auf denen man versucht hat, die Musik zu fundieren, sei dies bei den Alten oder bei den Modernen, sich im Gegenteil aus der Sache selbst ergeben, nämlich aus der Harmonie, die von der Resonanz eines klingenden Körpers herrührt;

Die *résonnance d'un Corps sonore* verursacht eine Harmonie. Resonanz wird hier in ähnlicher Bedeutung gebraucht wie bei Praetorius [vgl. Kap. [2.5.3](#)] und *Harmonie* ist für Rameau eine Vielheit von Tönen:

L'HARMONIE qui consiste dans un mélange agréable de plusieurs Sons différens, est un effet naturel, dont la cause réside dans l'Air agité par le choc de chaque Corps sonore en particuliere. [Rameau 1737, 1]

Die HARMONIE, die aus einer angenehmen Mischung mehrerer verschiedener Töne besteht, ist eine natürliche Erscheinung, deren Ursache in der durch den Schock eines jeden klingenden Körpers angeregten Luft liegt.

Resonanz ist also nicht nur die Reaktion oder Rückstrahlcharakteristik des Körpers auf das Anschlagen, sondern auch diejenige der Luft auf den klingenden Körper. Die Resonanz – das Spektrum – eines klingenden Körpers besteht entgegen der landläufigen Meinung aus mehreren Tönen:

Donc le Son appréciable, réputé unique, est Harmonieux de sa nature; [Rameau 1737, 28]

Der als einheitlich angesehene, wahrnehmbare Ton ist in seiner Natur harmonisch.

Der bisher als unteilbare Einheit angenommene physikalische Grundbaustein der Musik ist also in Wirklichkeit eine Vielheit:

Jusqu'ici le Son pris pour l'objet Physique de la Musique a toujours été réputé seul & unique, lorsque cependant il est Triple de sa nature [Rameau 1737, 30]

Bis jetzt ist der Ton als physikalischer Gegenstand der Musik immer als allein und einzig angesehen worden, indessen ist er von dreifacher Natur.

Die Wendungen *Harmonieux de sa nature* und *Triple de sa nature* biegen die Gefahren, die in einem gespaltenen Grundbaustein der Musik lauern, um in eine durchaus auch religiös gedachte höhere Einheit. Diese „harmonische Dreifaltigkeit des Tons“ wird gemäss Rameau von allen klingenden Körpern zum Ausdruck gebracht.

Die physikalische Theorie, die die Entstehung und simultane Übertragung der Vielfalt von Tönen durch die Luft erklären soll, wird in den Propositionen III und V entwickelt. Damit glaubt Rameau die im Vorwort angesprochene Quelle des Lichts zu begreifen:

Nous devons supposer l'Air divisé en une infinité de particules, dont chacune est capable d'un Ton particulier; lorsque par exemple, on entend à la fois les deux Sons de la Quinte, dont l'un fait deux vibrations pendant que l'autre en fait trois, on ne conçoit pas comment la même masse d'Air peut fournir dans un même tems ce différent nombre de vibrations; à plus forte raison encore s'il se trouve un plus grand nombre de Sons ensemble, au lieu qu'il est bien plus plausible d'imaginer en ce cas que chacun de ces Sons naît d'une masse d'Air particuliere, dont le nombre des vibrations occasionne le degré du Ton qui nous affecte pour

Wir müssen uns die Luft als in eine unendliche Zahl von Teilchen zerlegt vorstellen, von denen jedes zu einem bestimmten Ton fähig ist; denn wenn man zum Beispiel die beiden Töne der Quinte, von denen der eine zwei Schwingungen macht, während der andere deren drei macht, zugleich hört, so kann man sich nicht vorstellen, wie die gleiche Luftmasse gleichzeitig diese verschiedene Zahl von Schwingungen übertragen kann; noch weniger, wenn eine noch grössere Zahl von Tönen gemeinsam vorhanden sind. Hingegen ist es viel plausibler sich in diesem Fall vorzustellen, dass jeder dieser Töne in einer

lors. [Rameau 1737, Prop. III, 2-3]

speziellen Luftmasse entsteht, deren Zahl von Schwingungen die Tonhöhe verursacht, die dabei auf uns trifft.

Im Anschluss an die zitierte Passage verweist Rameau auf de Mairan (1678-1771), der ihm seine 1720 publizierte Theorie der resonierenden Luftpartikel etwa zehn oder zwölf Jahren zuvor, also zur Zeit des *Nouveau Système* dargelegt habe. Rameau sah zu dieser Zeit darin noch keinen Nutzen für sein eigenes System. De Mairans Theorie zur Erklärung der Superposition in der Luft wird auch von Rousseau in den Artikeln *Son* der *Encyclopédie* und des *Dictionnaire de Musique* diskutiert. Sie wird von de Mairans selbst in einer umfangreichen Abhandlung in den *Mémoires de l'Académie Royale* [Mairan 1737], die im gleichen Jahr wie Rameaus *Génération harmonique* erscheint, dargelegt.

Gemäss dieser Theorie ist die Luft zerlegt in Teilchen, die je eine charakteristische Eigenfrequenz haben. Verschiedene Töne werden von verschiedenen Teilchen auf verschiedenen Wegen übertragen. Die *infinité de particules* will dabei wörtlich genommen werden. Wie sonst ist es möglich, dass für jede beliebige Frequenz überall genügend viele resonanzfähige Teilchen vorhanden sind? Die einzelnen Teilchen werden dadurch aber unendlich klein. Sie wären also ausdehnungslose klingende Partikel.

Nicht nur die Teilchen zur gleichen Frequenz, sondern alle Teilchen mit kommensurabler Frequenz werden angeregt.

Un Corps sonore mis en mouvement, communique ses vibrations, non-seulement aux particules de l'Air capables des mêmes vibrations, mais encore à toutes les autres particules commensurables aux premières; & ces différentes particules réagissant à leur tour sur ce même Corps, aussi bien que sur tous ceux qui l'environnent, tirent non-seulement différents Sons des différentes parties aliquotes de ce premier Corps; & par-là lui font rendre des Sons plus aigus que celui de sa totalité; mais elles agitent encore tous ceux d'alentour, qui sont capables des mêmes vibrations, & les font quelquefois, même, résonner.

A l'égard des vibrations plus lentes que celles du corps total, si elles ne peuvent avoir d'action que sur de plus grands corps, elles servent du moins à fortifier dans l'Oreille le Son qui les occasionne. [Rameau 1737, Prop. V, 4-5]

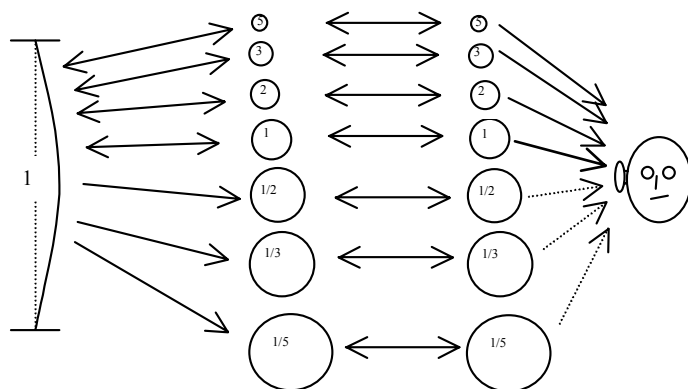
Ein in Bewegung versetzter Körper überträgt seine Schwingungen nicht nur auf die Luftteilchen, die fähig sind zu den gleichen Schwingungen, sondern auch auf alle anderen Teilchen, die mit den ersteren kommensurabel sind; und diese verschiedenen Teilchen, die ihrerseits auf denselben Körper ebenso wie auf alle umgebenden zurückwirken, beziehen nicht nur verschiedene Töne der verschiedenen aliquoten Teile des ersten Körpers und lassen ihn dadurch höhere Töne als denjenigen seiner Gesamtheit hervorbringen, sondern sie regen auch noch alle umgebenden an, die zu eben diesen Schwingungen fähig sind und bringen sie manchmal sogar zum Mitklingen.

Was die Schwingungen, die langsamer als diejenigen des ganzen Körpers sind, betrifft: auch wenn sie nur Einfluss nehmen auf grössere Körper, so dienen sie immerhin dazu, im Gehör den Ton, der sie verursacht, zu verstärken.

Zu einer gegebenen Ausgangsfrequenz werden nicht nur alle ganzzahligen Frequenzvielfachen, sondern auch alle ganzzahligen Frequenzteiler angeregt. Es resultiert eine beidseitig unendliche Zahlenfolge von Frequenzvielfachen:

$$\dots, \frac{1}{5}, \frac{1}{4}, \frac{1}{3}, \frac{1}{2}, 1, 2, 3, 4, 5, \dots$$

Die angeregten Teilchen kommunizieren mit allen umgebenden Körpern, insbesondere auch mit dem verursachenden klingenden Körper, und versetzen sie in Resonanz. Dadurch wird also die Resonanz der tieferen Oktave, tieferen Duodezim, etc. möglich.



Die Schallquelle versetzt Schallteilchen mit kommensurabler Frequenz in Resonanz. Diese kommunizieren unter einander und bewirken im Rezipienten die Tonempfindung.

Hingegen wird der Fundamentaltone 1 zum Durdreiklang dreier Saiten 4 : 5 : 6 nicht in den klingenden Saiten selbst, sondern nur im Gehör verstärkt, da die Saiten selbst keine tieferen Töne als ihren Grundton hervorbringen oder verstärken können.

Abstrahiert man von diesen Schallteilchen und schreibt jedem Punkt der Luft einen Schalldruckverlauf zu, resultiert aus Rameaus Auffassung eine nicht-lineare Übertragung der Schwingung des klingenden Körpers in die Luft. Unabhängig davon, ob in der Schallquelle eine einfache oder zusammengesetzte periodische Schwingung vorliegt, in der Luft werden nicht nur die Teilchen zu Frequenzen der Obertonreihe, sondern auch diejenigen zur Untertonreihe aller Primärtöne angeregt. Die Anregung von Obertonfrequenzen hat eine Veränderung der ursprünglichen Schwingungsform bei gleicher Periodizität zur Folge, wenn die Teilschwingen addiert werden. Das Anregen von Untertonfrequenzen dagegen bewirkt, dass der Schalldruckverlauf nicht mehr periodisch zur Frequenz v ist, sondern zur tiefsten angeregten Untertonfrequenz..

Die Grösse oder Masse zweier in Wechselwirkung stehender klingender Körper bestimmt das Ausmass der gegenseitigen Resonanz:

Les plus grands corps ont plus de puissance sur les plus petits, que celui-ci sur les premiers; d'où il suit que les vibrations les plus lentes ont plus de puissance sur les plus promptes, que celles-ci sur celles-là; & que par conséquent les plus promptes n'agitent que faiblement les plus lentes, ne peuvent donner aux corps qui les reçoivent tout l'ébranlement nécessaire, pour que le Son puisse en être transmis à l'Oreille. [Rameau 1737, Prop. VI, 5]

Die grösseren Körper haben mehr Einfluss auf die kleineren als umgekehrt, woraus folgt, dass die langsameren Schwingungen mehr Einfluss auf die schnelleren haben als umgekehrt und dass sie folglich, da die schnelleren nur schwach auf die langsameren einwirken, dem Körper, der sie empfängt, nicht die ganze notwendige Erschütterung geben können, damit der Ton zum Gehör übertragen werden könnte.

Tiefe Töne werden damit zu schweren Tönen, ganz im Doppelsinne des französischen *grave* und Resonanz kann als proportional zur Gravitationskraft gedacht werden. Im Widerspruch dazu wird in Proposition VIII, der Einfluss der tieferen auf die höheren Töne als Dämpfung gedeutet:

La résonance des plus grandes parties aliquotes doit naturellement étouffer celle des plus petites. [Rameau 1737, Prop. VIII, 6]

Die Resonanz der grösseren aliquoten Teile muss auf natürliche Weise diejenige der kleineren dämpfen.

In einem Kommentar dazu spricht Rameau sogar von *extinction* (Auslöschung) [Génération, 25]. In Proposition VII wird auf die Bedeutung des grössten gemeinsamen Masses als die am meisten kommensurable Frequenz zweier klingender Körper hingewiesen:

Les Sons les plus commensurable sont ceux qui se communiquent leurs vibrations les plus aisément & le plus fortement; d'où il suit que l'effet de la plus grande commune mesure entre les Corps sonores, qui se communiquent leurs vibrations par l'entremise de l'Air, doit l'emporter sur celui de toute autre partie aliquote, puisque cette plus grande commune mesure est la plus commensurable. [Rameau 1737, Prop. VII, 5-6]

Die am meisten kommensurablen Töne sind diejenigen, die sich ihre Schwingungen am leichtesten und stärksten gegenseitig mitteilen, woraus folgt, dass die Wirkung des grössten gemeinsamen Masses zwischen den klingenden Körpern, die sich ihre Schwingungen durch die dazwischengeschaltete Luft übermitteln, über diejenige jedes anderen aliquoten Teils vorherrschen muss, weil das grösste gemeinsame Mass das am meisten kommensurable ist.

Wie sich aus der Analyse von Rameaus Beispielen [Génération, Exp. I,II, 7-10] ergibt, entspricht dieses grösste gemeinsame Mass nicht etwa dem grössten gemeinsamen Teiler der Primärfrequenzen und damit der Frequenz des Fundamentalbasses, sondern dem kleinsten gemeinsamen Vielfachen der Primärfrequenzen, also dem tiefsten gemeinsamen Oberton. Das grösste gemeinsame Mass bezieht sich auf die Längen der aliquoten Teile des klingenden Körpers. Die Proposition dient also nicht als physikalische Evidenz des Fundamentalbasses. Die Verwendung des Begriffs *Corps sonore* suggeriert eine allgemeine physikalische Gesetzmässigkeit. Der von Rameau behauptete Sachverhalt lässt sich in seiner Allgemeinheit nur über Frequenzen und nicht über aliquote Teile beliebiger klingender Körper sinnvoll behaupten, ist aber auch dann nicht korrekt, da die Stärke der Resonanz eines Partialtons vom Spektrum des anregenden Tons und von der Resonanzcharakteristik des angeregten Körpers abhängt.

In Rameaus Adaption der Theorie von de Mairan spielt die Nicht-Linearität der Luft die entscheidende Rolle für die Universalität der Obertonreihe und der Untertonreihe: Die Luft generiert aus einfachen Tönen Harmonien. Während Resonanz zwischen verschiedenen klingenden Körpern nur auf den Eigenfrequenzen spielt – im Falle der Saite entsprechen ihnen Schwingungen der ganzen Saite und Partialschwingungen auf den aliquoten Teilen –, ist die Luft ein Resonanzsystem für beliebige Töne. Die Aufgabe der Schallübertragung wird von verschiedenen ebenfalls auf bestimmte Eigenfrequenzen eingestimmten Schallteilchen übernommen. Neben den Teilchen mit gleicher Eigenfrequenz werden aber auch alle Teilchen zu Frequenzvielfachen angeregt. Ein vorgegebenes Schallteilchen der Eigenfrequenz v wird von allen Frequenzen v , $v/2$, $v/3$, $v/4$, ... angeregt. Dies erklärt die Entstehung der Obertöne zu v . Dasselbe Teilchen wird aber auch von Vielfachen der Frequenz v angeregt, also von $2v$, $3v$, $4v$, ... Dies erklärt die Untertöne. Die Kombination der beiden Effekte bewirkt somit ein Ansprechen des vorgegebenen Teilchens auf jegliche Frequenz mit rationalem Verhältnis zu v .

Beispielsweise bewirken die in willkürlicher zweidimensionaler Anordnung dargestellten Primärtonfrequenzen

$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}$	1	2	3	4	5	6
$\frac{1}{10}$	$\frac{1}{8}$	$\frac{1}{6}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{2}$	1	$\frac{3}{2}$	2	$\frac{5}{2}$	3
$\frac{1}{15}$	$\frac{1}{12}$	$\frac{1}{9}$	$\frac{1}{6}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{2}{3}$	1	$\frac{4}{3}$	$\frac{5}{3}$	2
$\frac{1}{20}$	$\frac{1}{16}$	$\frac{1}{12}$	$\frac{1}{8}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{2}{4}$	$\frac{3}{4}$	1	$\frac{5}{4}$	$\frac{3}{2}$
$\frac{1}{25}$	$\frac{1}{20}$	$\frac{1}{15}$	$\frac{1}{10}$	$\frac{1}{5}$	$\frac{2}{5}$	$\frac{3}{5}$	$\frac{4}{5}$	1	$\frac{6}{5}$

alle ein Mitklingen des Luftpartikels „1“, und dieses repräsentiert einen Ton der Eigenfrequenz 1 in der Luft. Dieses Teilchen ist damit in einem Tonsystem der reinen Stimmung und unter Voraussetzung streng harmonischer Teiltonspektren immer in Resonanz. Erst die willkürliche Gewichtung der Stärke des Mitklingens liefert musikalisch brauchbare Ergebnisse. Das Teilchen reagiert nur schwach auf 3, 5, 6, 7 im Vergleich zu 1, 2, 4, 8, denn

als Untertöne treten nur die Oktave und ihre Vielfachen beobachtbar in Erscheinung. Es reagiert hingegen stärker auf $1/2$, $1/3$, $1/4$, $1/5$, als Oberton dieser Primärtöne wird es leicht angeregt, auf $1/7$ reagiert es weniger als auf $1/6$ oder $1/8$, etc.

Gesamthaft gesehen, schafft Rameaus partiell zugelassene Anregung von Untertonfrequenzen, die sich aus dem Hineintragen des mathematischen Begriffs der Kommensurabilität in die Physik der Resonanzphänomene ergibt, mehr Probleme als Lösungen, denn die zahlreichen „unbrauchbaren“ Zahlenverhältnisse müssen in unsystematischer Weise und mit ad hoc-Begründungen wieder ausgefiltert werden. Anlass dazu war zum Einen die in Zusammenhang mit der postulierten Oktavinvarianz der Intervalle falsch beobachtete Untertonresonanz in die tiefere Oktave. Zum Anderen hängt sie mit der Sonderrolle des *Son fondamentale* als *sous-entendu* zusammen.

Naheliegender wäre der vollständige Verzicht auf die Untertöne und die Beschränkung des Mitklingens auf ganzzahlige Frequenzvielfache. Stellt man sich zu diesem Zweck den „Elementarton“ im klingenden Körper als periodische Impulsfunktion vor und die Schallpartikel als Träger von Sinusschwingungen, so werden die ganzzahligen Frequenzvielfachen auf „natürlicher Weise“, bei linearer Übertragung, in Resonanz versetzt. Hingegen bleibt die Nicht-Linearität beim Übergang in die Luft bei sinusförmigen instrumentalen Elementartönen bestehen. Durch den nicht-linearen Übergang ist das Gesetz der Obertonreihe gleichsam in den Schallpartikeln der Luft vorgezeichnet und nicht von der unvollkommenen Geometrie und Materialeigenschaften konkreter klingender Körper abhängig. Das Phänomen der durch hohe Lautstärken verursachten subjektiven Obertöne ist ein analoger Effekt an der Schnittstelle von Luft und Gehör und wird von De Mairan [1737] auch so gedeutet.

Das Rätsel der Entstehung der Vielzahl von Schwingungen in einem klingenden Körper wird in Rameaus Theorie an die Schnittstelle zwischen dem klingenden Körper und der Luft delegiert. Darüberhinaus operiert die Luft als Frequenzanalysator, indem sie den zusammengesetzten Schall in Bestandteile zerlegt und diese über die geeigneten Teilchen ans Gehör leitet. Das Mitschwingen eines andern Körpers ist eine Reaktion auf diese Bestandteile. Letzteres widerspiegelt direkt de Mairans Auffassung [vgl. die Darstellung von Rousseau im Artikel *Son*].

Proposition XII gibt ferner eine anschauliche Vorstellung von der Frequenzverarbeitung im Gehör in Form einer primitiven Ortstheorie im Sinne von Helmholtz:

Ce qu'on a dit des Corps sonores doit s'entendre également des Fibres qui tapissent le fond de la Conque de l'Oreille; ces Fibres sont autant de corps sonores auxquels l'Air transmet ses vibrations, & d'où le sentiment des Sons & de l'Harmonie est porté jusqu'à l'Ame. [Rameau 1737, 7]

Was über die klingenden Körper gesagt wurde, lässt sich in gleicher Weise auf die Fasern, die den Grund der Ohrmuschel bedecken, übertragen; diese Fasern sind ebenfalls klingende Körper, auf welche die Luft ihre Schwingungen überträgt, und von da wird die Empfindung der Töne und der Harmonie an die Seele weitergeleitet.

Die Fasern in der Ohrmuschel sind saitenähnliche klingende Körper, die durch die betreffenden Schallteilchen in Resonanz versetzt werden. Diese Vorstellung übernimmt Rameau auch von de Mairan [1737] [vgl. Kap. [3.1.4](#)]. Der Übergang von der Luft ins Gehör beziehungsweise vom Gehör ins Gehirn, leistet ebenso wie derjenige vom klingenden Körper in die Luft kein treues Abbild des am Trommelfell ankommenden Frequenzgemischs, denn die Oktaven werden, obschon sie physikalisch deutlich als Schwingungen vorhanden sind, aufgrund ihrer grossen Einheit nicht erkannt und die Frequenzvielfachen 3 und 5 verschmelzen, je nach Aufmerksamkeit, mit dem Grundton, so dass die Wahrnehmung eines Molldreiklangs nicht in die vollkommene Kakophonie ausartet:

Prenez les Jeux de l'Orgue qu'on appelle *Bourdon, Prestant ou Flute, Nazard & Tierce*, & qui forment entr'eux l'Octave, la Douzième & la Dix-septième majeure du *Bourdon*, en rapports de $1 \frac{1}{2} \frac{1}{3} \frac{1}{5}$; enfoncez une Touche pendant que le seul Bourdon résonne, & tirez successivement chacun des autres jeux; vous entendrez leurs Sons se mêler successivement les uns avec les autres, vous pourrez même les distinguer les uns des autres pendant qu'ils seront ensemble: mais si, pour vous en distraire, vous Préludez un moment sur le même Clavier, pendant que tous ces Jeux résonnent ensemble & que vous reveniez ensuite à la seule Touche d'auparavant, vous ne croirez plus y distinguer qu'un seul Son, qui sera celui du *Bourdon*, le plus grave de tous, le fondamental, celui qui répond au Son du Corps total.

Pendant que ces Jeux sont ouverts, enfoncez les trois Touches *mi, sol, si*, qui forment entr'elles un Accord très-agréable, auquel on donne même le nom de Parfait; vous ne croirez n'y entendre que ces trois seuls Sons *mi, sol, si*, [...] lorsque pendant vous sçavez que chaque Touche y fait résonner trois Sons différens, sans compter l'Octave; de sorte même que si un seul des autres Sons, qu'on y distingue pas, venoit à frapper l'Oreille, le tout formeroit une Cacophonie insupportable [...] [Rameau 1737, Exp. IV, 13-14]

Nehmen Sie die Register der Orgel, die man *Bordun, Prestant oder Flöte, Nazard und Terz* nennt, die unter sich die Oktave, Duodezim und grosse Septdezim zum *Bordun*, mit den Verhältnissen $1 \frac{1}{2} \frac{1}{3} \frac{1}{5}$, bilden; drücken Sie eine Taste, während allein der *Bordun* resoniert und ziehen Sie sukzessive die anderen Register; Sie werden hören, wie sich die Töne sukzessive miteinander mischen, Sie können sie sogar von einander unterscheiden, während sie zusammen sind. Aber wenn Sie, um sich davon abzulenken eine Weile auf der gleichen Klaviatur präludieren, während alle diese Register gemeinsam erklingen, und sie anschliessend zur einzigen Taste von vorher zurückkehren, werden Sie glauben, nur einen einzigen Ton wahrzunehmen, der derjenige des *Borduns* ist, der tiefste von allen, der fundamentale, der auf den Ton des gesamten Körpers antwortet.

Drücken Sie, während alle diese Register gezogen sind, die drei Tasten *e, g, h*, die unter sich einen sehr angenehmen Akkord bilden, dem man sogar die Bezeichnung vollkommen gibt, und Sie werden glauben, allein die drei Töne *e, g, h* zu hören [...] obschon Sie wissen, dass jede Taste, ohne die Oktave zu berücksichtigen, drei verschiedene Töne erklingen lässt, deren Gesamtheit eine unerträgliche Kakophonie bilden würde, falls einer dieser andern Töne, die man nicht unterscheiden kann, das Ohr trifft.

Der Molldreiklang erzeugt demnach die Tonigkeiten *d, dis, e, fis, g, gis*, und *h*, in Rameaus Darstellung [Rameau 1737, 14]:

$$\left\{ \begin{array}{ccccccccc} \text{mi.} & \text{fi.} & \text{solx.} & \text{sol.} & \text{ré.} & \text{fi.} & \text{fi.} & \text{fax.} & \text{réx.} \\ \text{5.} & \text{15.} & \text{25.} & \text{6.} & \text{18.} & \text{30.} & \text{15.} & \text{45.} & \text{75.} \end{array} \right\}$$

Der erste Absatz illustriert, deutlicher als im *Nouveau Système*, die Verschmelzung der Töne bei der Klangsynthese an der Orgel als Funktion der Aufmerksamkeitslenkung, der zweite thematisiert die Abgrenzung des Tons als Akkord von einem Akkord solcher Akkorde. Die auf das Trommelfell auftretende *Kakophonie* wird beim Hören in sinnvolle Gruppen zusammengefasst, und von jeder Gruppe wird nur ihr Hauptvertreter, ihr Fundament, als Ton bewusst rezipiert.

Die Ausgangsfrage von Mersenne an seine Zeitgenossen, wie eine Saite die Töne, die sie je einzeln hervorbringen oder reflektieren kann, auch gleichzeitig zum Erklingen bringen kann – die Superposition der Eigentöne im klingenden Körper selbst –, bleibt dabei unbeantwortet. Wie sind in einem Körper gleichzeitig verschiedene Schwingungen möglich, ohne dass sie sich gegenseitig behindern?

Die von Rameau postulierte automatische Aktivierung des Obertonspektrums verschleiert die Sicht auf die Klangqualität als spektrales Merkmal des klingenden Körpers, denn der letztendlich gehörte Ton resultiert aus einer komplizierten, rückgekoppelten Überlagerung der Übertragungscharakteristik des Primärtons an die Luft mit den Resonanzeigenschaften des klingenden Körpers. Dennoch lässt Rameaus Verwendung des Begriffs der Resonanz in einer

der Klangfarbe nahen Bedeutung wie bei Praetorius eine spektrale Theorie als greifbar nahe erscheinen.

3.1.4. De Mairan: Resonanztheorie des Hörens (1737)

Die beiden zusammengehörigen und zusammen erschienenen Aufsätze de Mairans *Discours sur la Propagation du Son dans les différents Tons qui le modifient* und seine *Eclaircissements* ... [Mairan 1737], welche, die von Rameau rezipierte Resonanztheorie wesentlich ausführlicher als 1720 darlegen, stellen einen ungewöhnlichen bisher wenig beachtet gebliebenen ganzheitlichen Syntheseversuch einer Hörtheorie vor dem Hintergrund der Unsicherheit über die Natur von Schall und Licht dar. Der Ansatz verdiente eine ausführlichere Würdigung, als sie hier gegeben werden kann.

Hine sieht in de Mairan, den Versuch, Newtons Partikeltheorie des Lichts auf den Schall zu übertragen [Hine 1996]. Dem ist nur bedingt beizustimmen, denn de Mairan bespricht nicht nur die Gemeinsamkeiten, sondern auch die Unterschiede der beiden Arten der Informationsübertragung. Die Tendenz scheint eher die zu Gunsten einer Vereinheitlichung Richtung Wellenlehre, doch diese steht im Widerspruch zu Newtons Brechungsgesetz für Sonnenlicht auf Partikelbasis.

Die klare Auftrennung der Übertragungskette für Schall in die vier Stationen

corps sonore [...] sujet immédiat par ses vibration [...]
 air le milieu [...] susceptible des vibrations du corps sonore [...]
 organe de l'ouïe [...] ébranlé par les vibrations de l'air [...]
 Ame [...] le sentiment qu'elle reçoit [...] [Mairan 1737, 1-2]

und in analoger Weise für Licht, erlaubt de Mairan eine differenzierte Beurteilung der Gemeinsamkeiten und Unterschiede.

Er referiert ausführlich Newtons Zuordnung zwischen den sieben Spektralfarben und den sieben Tönen der diatonischen Skala, beurteilt sie aber im Unterschied zu seiner früheren Einschätzung als oberflächlich und nicht im Wesen der Sache liegend. Dies zeigt sich vor allem beim Übergang von der dritten zur vierten Station, das heisst am Schnittpunkt von Physis und Psyche:

La couleur, en tant que sentiment, ne ressemble pas plus au Son ou à l'odeur, que la vitesse d'un corps en mouvement à sa figure, ou son poids à sa saveur. Il n'y a de relation entre ces sentiments, que par l'intensité ou la grandeur; nulle relation d'ailleurs, ni dans leur nature, ni dans l'idée qui nous les représente. [Mairan 1737, 35-36]

Die Farbe als Empfindung ähnelt dem Ton oder dem Geruch nicht mehr als die Geschwindigkeit eines Körpers seiner Gestalt oder sein Gewicht seinem Geschmack. Es gibt keinen Zusammenhang zwischen diesen Empfindungen als denjenigen ihrer Stärke oder Grösse, keinen Zusammenhang darüber hinaus, weder in der Natur noch in der Vorstellung welche sie uns darbietet.

[...] dans le Physique ou le Mécanique de nos sensations de ton, ou de couleur, on n'aperçoit que des ébranlements plus ou moins forts, plus ou moins fréquents, sur les fibres de l'organe, causé par les vibrations plus ou moins fortes, & plus ou moins promptes de la part des corps lumineux, ou sonores, & des milieux qui leur servent de véhicule. [Mairan 1737, 30]

[...] in der Physik oder Mechanik unserer Ton- oder Farbempfindungen erkennt man nichts als mehr oder weniger starke, mehr oder weniger häufige Erschütterungen auf den Fasern des Organs, verursacht durch die mehr oder weniger starken und mehr oder weniger häufigen Vibrationen seitens der leuchtenden oder klingenden Körper und den Medien, die ihnen als Vehikel dienen.

Insbesondere zeige das Auge keine vergleichbare Sensitivität für Farbunterschiede wie das Gehör für Wellenlängen- oder Frequenzverhältnisse. Das Konzept der musikalischen

Intervalle, ihre Transponierbarkeit, sei in der Spektralfarbenwahrnehmung kaum ausgeprägt [35]. Unvergleichbar sei auch der unangenehme Effekt des Glissandos im Vergleich zur angenehmen Wirkung feiner optischer Farbübergänge [Mairan 1737, 39].

Der gemeinsame Nenner der beiden Empfindungsarten liegt nur in der Stärke der Empfindungen. Müllers Theorie der spezifischen Sinnesempfindungen, die Helmholtz seiner Sinnesphysiologie zu Grunde legt, scheint hier antizipiert.

Bezüglich Milieu nimmt de Mairan in diesem Aufsatz für Schall das Wellenparadigma, aber für Licht die Korpuskeltheorie Newtons mit verschiedenen Ausbreitungsgeschwindigkeiten der sieben Primitivfarben, an, obschon er nicht frei von Zweifeln ist. Die folgende Formulierung ist bewusst offen für beide Theorien formuliert:

degré de force, ou de fréquence de vibrations de la lumière [Mairan 1737, 40-41],

wobei sich „degré de force“ auf die unterschiedliche Geschwindigkeit der Farbpartikel (und damit ihre Energie) bezieht.

Die Analogie ist also je nach Theorie eine mehr oder weniger oberflächliche:

Le Son & la Lumière sont aussi analogues dans leurs milieux, en tant que ces milieux sont capables de recevoir & de transmettre leurs mouvements ou les vibrations du corps sonore & du corps lumineux, & l'un et l'autre contiennent des parties propres à chaque modification particulière de leur genre, l'un à chaque ton, l'autre à chaque couleur comme je pense l'avoir prouvé. [Mairan 1737, 36]

Schall und Licht sind ziemlich ähnlich in ihren Medien, was die Fähigkeit anbelangt, ihre Bewegungen oder Vibrationen der klingenden und leuchtenden Körper zu empfangen und zu übertragen, und beide enthalten für jede spezifische Veränderung ihrer Art empfängliche Teilchen, das Eine zu jeder Tonhöhe, das Andere zu jeder Farbe, wie ich glaube bewiesen zu haben.

Diese Stelle lässt an eine Wellentheorie denken. Lichtausbreitung setzt, offenbar wie bei Euler, eine Art materiellen Äther voraus, eine Auffassung, die im Rahmen des Wellenparadigmas erst mit Maxwells elektromagnetischer Theorie des Lichts (1864) widerlegt wird, wonach sich elektromagnetische Schwingungen auch im Vakuum ausbreiten.

De Mairans Formulierung der Resonanztheorie der Tonhöhenverarbeitung nimmt in allen wesentlichen Punkten die Theorie von Helmholtz vorweg:

L'organe immédiat de l'ouïe est en effet, on le peut dire, un véritable Instrument de Musique, comme l'œil est une vraie Lunette d'approche: c'est une sorte de Clavecin, formé d'une substance dure, osseuse, & propre à réfléchir le Son, dont la capacité remplie d'air, & fort large d'un côté, se termine en pointe de l'autre, dans lequel sont tendues une infinité de cordes, qui par leur différentes longueurs, & par leurs différentes tensions, sont en état de fournir aux rapports, & aux vibrations de tous les tons possibles. [Mairan 1737, 10]

Das unmittelbare Hörorgan ist in der Tat, man darf so sagen, ein wahrhaftiges Musikinstrument, so wie das Auge ein wahres Fernrohr ist: Es ist eine Art Cembalo, gebildet durch harte, knochige Substanz, die geeignet ist, den Ton zu reflektieren; ihr Inhalt ist mit Luft gefüllt, sie ist ziemlich breit auf der einen Seite und endet auf der anderen in einem Punkt. Darin sind eine unendliche Zahl von Saiten gespannt, die durch ihre verschiedene Längen und verschiedene Spannung in der Lage sind, für die Verhältnisse und Schwingungen aller möglichen Töne aufzukommen.

Es folgt eine Reverenz an Du Verney [1683]. Die Metapher des Cembalos mit einem System unendlich vieler quergespannter Saiten bedeutet gegenüber Du Verney eine klare Verfeinerung.

De Mairans mechanische Deutung der Reaktion des Resonanzsystems auf leicht verstimmte Einklänge und auf allgemein inharmonische Klänge, bedingt durch die örtliche Nähe der Resonanzbereiche, kommt Helmholtz Schwebungstheorie sehr nahe:

[...] les Sons non harmoniques, les mauvais accords, dont la commensurabilité avec le Son principal est beaucoup moindre, ou nulle, répondant à des fibres trop proches les unes des autres, ne pourront les ébranler ensemble d'un & d'autre côté, sans causer sur la membrane de plis aigus, plutôt que des ondes, & sans risquer par-là de la fausser, de la déchirer, ou de la rompre. C'est pourquoi, & par les mêmes loix, nous devons dans cette occasion éprouver un sentiment d'inquiétude ou de douleur. [Mairan 1737, 16]

[...] die nicht harmonischen Töne, die schlechten Akkorde, deren Kommensurabilität mit dem Hauptton viel geringer oder gar keine ist, die den einander zu nahe liegenden Fasern entsprechen, können sie nicht gemeinsam auf der einen und anderen Seite erschüttern, ohne in der Membran scharfe Falten zu erzeugen statt Wellen und nicht ohne Gefahr zu laufen, sie dadurch zu verfälschen, zu zerreißen oder zu brechen. Deshalb und wegen denselben Gesetzen kommt es, dass wir in diesem Fall ein Gefühl der Unruhe und des Schmerzes erdulden müssen.

Bei de Mairan übernimmt die Luft die Rolle des Frequenzanalysators, sie selbst wird als Resonanzsystem angesehen. Die Universalität der harmonischen, rationalen Frequenzverhältnisse ist dabei als Naturgesetz der kommensurablen Resonanz vorgezeichnet. Was die Theorie also mit Hilfe der angenommenen Nicht-Linearität bei der Schallübertragung leistet, ist eine Auszeichnung der harmonischen Teiltonverhältnisse als störungsfreie Zusammenklänge.

Abschliessend sei eine an Jean Paul gemahnende ästhetische Betrachtung wiedergegeben:

Si l'on sépare du plaisir qui naît d'un beau Tableau [...] tout ce qui s'y mêle d'intellectuel, on trouvera que la part de ce plaisir qui appartient aux couleurs, à leur distribution, ou si l'on veut à leur *harmonie*, s'évanouit presque entièrement. Le **riant**, ou le **sombre**, le **doux** ou le **terrible**, & tous les assemblages de couleurs, qui concourent à réveiller en nous ces différents sentiments, nous y plairont tour à tour; ou plutôt, uniquement attentifs à l'expression du sujet, & à son exécution de la part du Peintre, nous ne serons affectés ni par ces | couleurs-ci, ni par celles-là en elles-mêmes, ou nous ne le serons qu'infiniment peu. Le plaisir que fait un beau Tableau n'est donc, à proprement parler, qu'un **plaisir indirect**, & **réfléchi**. Mais le plaisir qui naît des Sons & des accords, d'une harmonie bien-sûtenue & bien variée dans une pièce de Musique, est une **impression très-forte, indépendamment de ce que l'esprit y peut appercevoir**; [...] [Mairan 1737, 44-45] [fette Hervorhebung: dm]

3.1.5. Daniel Bernoulli: Sinuston (1753/1764)

Ein über den Stand von Sauveur 1701 und Rameau hinausgehendes Verständnis der Bewegung der Saite erfordert den Einsatz der neuesten Erkenntnisse und Techniken der Analysis. Unabhängig voneinander leiten Taylor und Sauveur 1713 die Sinusschwingung zum Grundton als mögliche Bewegung der Saite her [Cannon et al. 1981, 15-27]. D'Alembert (1747) versteht die Aufgabe als Lösung einer Differentialgleichung, einer Gleichung also, in der die Lösung nicht eine Zahl, sondern eine Funktion ist [Pfeiffer et al. 1994, 244]. Daniel Bernoulli behauptet, die allgemeine Lösung sei eine Superposition von Sinusschwingungen. Erstmals wird die Gleichzeitigkeit mehrerer Schwingungen als mathematische Summe interpretiert und Bernoulli schreibt 1753:.

[...] tous les corps sonores renferment en puissance une infinité de sons [...] Mais ce n'est pas de cette multitude de vibrations appliquée aux cordes tendues, que Mrs. d'Alembert & Euler prétendent parler; elle n'étoit pas inconnue à M. Taylor [...] Effectivement tous les Musiciens conviennent, qu'une longue corde pincée donne en même tems, outre son ton fondamental, d'autre tous beaucoup plus aigus [...] Voilà une preuve évidente, qu'il peut se faire dans une seule & même corde en un mélange de plusieurs sortes de vibrations Taylориennes à la fois. [Bernoulli 1753,

Alle klingenden Körper beinhalten potentiell eine unendliche Zahl von Tönen [...] Aber es ist nicht von dieser Vielheit von Schwingungen angewendet auf die gespannten Saiten, wovon d'Alembert und Euler reden, sie war auch Taylor nicht unbekannt. [...] Tatsächlich bestätigen alle Musiker, dass eine lange gezupfte Saite in der gleichen Zeit, ausser ihrem Grundton andere viel höhere abgibt [...] Dies also ist ein offenkundiger Beweis, dass in einer einzigen Saite ein Gemisch von mehreren Arten von Taylorsche Schwingungen bestehen kann.

151–153]

Das Ohr ist Zeuge dafür, dass in einer Saite mehrere Schwingungen koexistieren können. Darüber hinaus werden die Töne mit den Sinusschwingungen gleich gesetzt:

Soit la longueur de la corde = 1, π le demi-cercle, dont le rayon = 1, peut-on douter que l'équation $y = a \sin x/l.\pi + c \sin 3x/l.\pi$ ne marque l'état d'une corde qui fait en même temps les vibrations du premier & du troisième ordre, & qui par conséquent donne en même temps le son fondamental & la douzième, puisqu'en faisant $a = 0$, on n'entendra absolument que ladite douzième, & qu'en faisant $c = 0$, on n'entendra que le son fondamental! [Bernoulli, 1764, 16 (Fussn)]

Sei l die Länge der Saite, π der Halbkreis mit Radius 1. Kann man daran zweifeln, dass die Gleichung $y = a \sin x/l.\pi + c \sin 3x/l.\pi$ den Zustand einer Saite beschreibt, die zur gleichen Zeit die Schwingungen der ersten und dritten Ordnung macht und die folglich gleichzeitig den Grundton und die Duodezim abgibt. Wenn man $a = 0$ macht, hört man nichts als die genannte Duodezim, und wenn man $c = 0$ macht, hört man nur den Grundton!

Die Auffassung von Bernoulli korrespondiert mit derjenigen von Ohm im 19. Jahrhundert: Die physikalischen Sinusschwingungen entsprechen auf Seite der Wahrnehmung genau den Tönen. Gleichzeitige Töne sind Summen von Sinusschwingungen. Wie aus einer solchen Summe die einzelnen Summanden durch das Gehör extrahiert werden können, wird von Bernoulli nicht thematisiert. Er geht davon aus, dass eine solche Zerlegung immer möglich ist, und nimmt wohl an, dass sie automatisch abläuft.

Aus unserer Perspektive ist die Eindeutigkeit der Summendarstellung essenziell: Kann die gleiche Summenschwungung mit verschiedenen Summanden oder mit veränderten Amplituden erhalten werden? Diese Eindeutigkeit der Darstellung ist nicht selbstverständlich. Zusammengesetzte Töne entsprechen im klingenden Körper und in der Luft Summenschwingungen. Ihre Bestandteile werden in der Wahrnehmung erkannt. Erfolgt diese Trennung vollständig, so bleibt nichts übrig, was sich aus der Zusammenwirkung der Komponenten ergibt.

Il n'est pas surprenant qu'on puisse tirer successivement un si grand nombre de tons d'un même tuyau; il est plus remarquable qu'on puisse souvent sans peine tirer deux tons à la fois d'un seul & même tuyau, dont chacun en particulier soit net, de durée & de force égale; c'est-là une preuve physique bien convainquante de ce que j'ai démontré sur la multiplicité des vibrations qui peuvent co-exister dans un même système [...]. [Bernoulli, 1764, 15]

Es ist nicht überraschend, dass man auf der gleichen Pfeife nacheinander eine so grosse Zahl von Tönen hervorbringen kann. Es ist bemerkenswerter, dass man gewöhnlich mühelos aus einer einzigen Pfeife auf ein Mal zwei Töne hervorbringen kann, von denen jeder rein ist und von gleicher Dauer und Stärke. Dies ist ein ziemlich überzeugender physikalischer Beweis von dem, was ich über die Vielheit der Schwingungen, die in einem System nebeneinander bestehen können, gezeigt habe [...].

Bernoullis Auffassung lässt sich wie folgt zusammenfassen: Die akustisch-physikalische Evidenz dient als Beweis für die mathematische Lösung. Die Identität von Ton und Sinusschwingung wird dabei stillschweigend vorausgesetzt.

Aus Bernoullis Auffassung ergibt sich die Unempfindlichkeit für Phasenbeziehungen schier zwangsläufig: Die Phasenlage einer isolierten Sinusschwingung ist irrelevant für die Wahrnehmung, die einzelnen Sinusschwingungen eines Tongemischs sind je einzeln wahrnehmbar und sie korrespondieren eins-zu-eins mit den Tönen. Die Phasen dieser Einzeltöne spielen je einzeln keine Rolle, also auch nicht in ihrer Überlagerung. Diese „Schlussfolgerung“ wird von Bernoulli nicht gezogen. Sie bedeutet, dass die Wahrnehmung keine Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Teiltönen erkennen kann. Falls das Ganze mehr als die Summe seiner Teile ist, das heisst sobald Wechselwirkungen zugestanden sind, kann nicht mehr von einer allgemeinen Phasentaubheit ausgegangen werden. Dieser Fehlschluss ergibt sich aus der Übertragung des Superpositionsprinzips auf die Wahrnehmung

und die wahrnehmungsbezogene Definition des Tons. Selbst dann, wenn die Sinusschwingung keine Obertöne hören lässt, kann nicht auf die Insensitivität für Phasenrelationen geschlossen werden.

3.1.6. Euler: Die allgemeinste Saitengleichung (1748/1755)

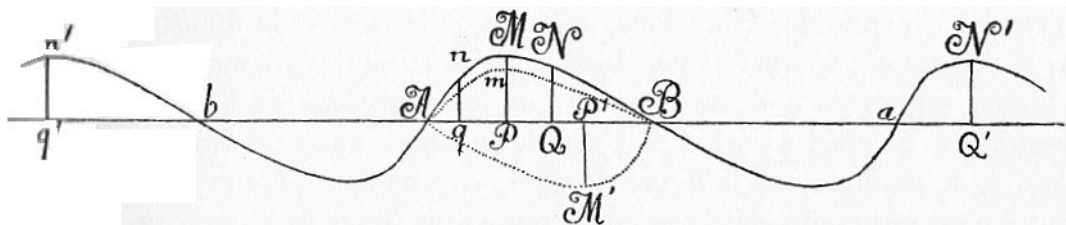
Wie bei Daniel Bernoulli stellt bei Euler [1748/1755] die Saite das Paradigma des Tonerzeugers schlechthin dar. Es geht dabei aber nicht primär um die Definition der psychoakustischen Grundbegriffe, sondern um die Beschreibung der allgemeinstmöglichen Bewegungen der (idealen) Saite. Eulers Überlegungen von 1765 sind für die Definition des Tons aus der Perspektive der Wahrnehmung nicht unerheblich. Sie werden in Kap. [3.3.4](#) besprochen.

Si une corde d'une longueur et d'une masse donné, est tendue par une force ou un poids donné; qu'au lieu de la situation droite, on lui donne une figure quelconque, qui ne diffère cependant de la droite qu'infiniment peu et qu'ensuite on la lâche tout à coup; déterminer le mouvement vibratoire total, dont elle sera agitée. [Euler 1748, 64]

Wenn eine Saite einer gegebenen Länge und einer gegebenen Masse durch eine Kraft oder ein gegebenes Gewicht gespannt wird; wenn man ihr anstelle der gestreckten Lage eine beliebige Gestalt gibt, die aber nur unendlich wenig von der gestreckten abweicht und man sie anschliessend plötzlich loslässt, die totale Vibrationsbewegung bestimmen, mit welcher sie bewegt wird.

Die präzise Fragestellung und Offenlegen der idealisierenden Annahmen setzen einen Standard für physikalische Untersuchungen.

Unter diesen Bedingungen ergibt sich eine periodische Gestaltänderung der Saite, die durch die Anfangsgestalt eindeutig bestimmt ist. Nach einer halben Schwingungsperiode ist diese Gestalt punktsymmetrisch zur Anfangsgestalt.



[Quelle: Euler 1748, 73]

Falls sich die Anfangsauslenkung als Summe von Sinustermen beschreiben lässt, ergibt sich für jeden Punkt der Saite eine Schwingung, die sich als Summe von Sinusschwingungen darstellen lässt:

$$y = \alpha \sin \pi x/a \cos \pi v/a + \beta \sin 2\pi x/a \cos 2\pi v/a + \gamma \sin 3\pi x/a \cos 3\pi v/a + \dots \quad [\text{Euler 1748, 76–77}]$$

Falls die Anfangsauslenkung Sinusgestalt hat:

[...] il faut remarquer que si β est = 0, γ = 0, δ = 0, etc., il en résulte le cas qu'on croît communément être le seul qui ait lieu dans la vibration des cordes, savoir $y = \alpha \sin \pi x/a \cos \pi v/a$, dans lequel la courbure de la corde est perpétuellement la ligne des sinus, ou une trochoïde prolongée à l'infini. Mais si le seul term β , ou γ ou δ etc. s'y trouve, cela forme des cas où le tems de la

Es ist zu bemerken, dass wenn β = 0, γ = 0, δ = 0, etc. ist, der Fall auftritt, den man gewöhnlich für den einzigen hält, der in der Saite stattfindet, nämlich $y = \alpha \sin \pi x/a \cos \pi v/a$, in welchem die Krümmung der Saite fortwährend die Linie des Sinus oder Trochoïde ins Unendliche verlängert darstellt. Aber wenn sich allein der Term β , γ oder δ etc. vorfindet, bildet dies Fälle, wo die Zeit der

vibration est moindre, ou du double, ou du triple, ou du quadruple etc. [Euler 1748, 77]

Vibration um das Doppelte, Drei- oder Vierfache etc. kleiner ist.

communément : Die Gleichung „Ton = Sinusschwingung“ dürfte nicht weiter als bis zu Taylor (1713) zurückreichen. Taylor war sich zwar bewusst, dass eine gezupfte Saite beim Loslassen nicht sinusförmig ausgelenkt ist, ging aber davon aus, dass sich diese Gestalt innerhalb weniger Schwingungen einstelle [Cannon et al. 1981, 18]. Daniel Bernoulli vertritt noch 1739 die gleiche Ansicht [Cannon et al. 1981, 92]. Superposition, das heisst ungestörte Überlagerung verschiedener Schwingungsmoden, wird von Bernoulli 1742 beobachtet [Cannon et al. 1981, 102]. Die Erkenntnis, dass sie als mathematische Summe zu deuten ist, scheint sich erst 1747 durchzusetzen.

M. BERNOULLI [...] soutient contre M. D'ALEMBERT et moi que la solution de TAYLOR est suffisante à expliquer tous les mouvemens, dont une corde est susceptible; de sorte que les courbes qu'une corde prend pendant son mouvement, soit toujours, ou une trochoïde allongée simple, ou un mélange de deux ou plusieurs courbes de la même espece. [Euler 1755, 233–234]

Bernoulli behauptet gegen d'Alembert und mich, dass die Lösung von Taylor hinreichend ist, um alle Bewegungen zu erklären, deren eine Saite fähig ist, derart dass die Kurven, die eine Saite während ihrer Bewegung annimmt, immer entweder eine einfache verlängerte Trochoïde oder eine Mischung von zwei oder mehrerer Kurven der gleichen Art sei.

Der Begriff *trochoïde allongée* (verlängerte Trochoïde) zeigt, dass die Sinuskurve noch nicht als periodische Funktion selbstverständlich ist.

Jeder Ton einer Saite kann gemäss Bernoulli als Mischung von Sinusschwingungen interpretiert werden. Dass Euler wie Bernoulli die Mischung als mathematische Summe versteht, ergibt sich implizit aus den obigen Zitaten [1748] und kommt im folgenden unmissverständlich zum Ausdruck:

Si toutes les courbes, auxquelles la corde s'applique pendant son mouvement, étoient comprises dans cette équation
 $y = \alpha \sin \pi x/a + \beta \sin 2\pi x/a + \gamma \sin 3\pi x/a + \delta \sin 4\pi x/a + \text{etc.}$
 le sentiment de M. Bernoulli seroit juste; [...] Mais, dès que le nombre des termes dans cette équation devient infini, il me paroît encore douteux, si l'on peut dire que la courbe soit composée d'une infinité de trochoïdes: le nombre infini semble détruire la nature d'une telle composition. [Euler 1755, 234]

Wenn alle Kurven, welche die Saite während ihrer Bewegung annimmt, in der Gleichung
 $y = \alpha \sin \pi x/a + \beta \sin 2\pi x/a + \gamma \sin 3\pi x/a + \delta \sin 4\pi x/a + \text{etc}$
 enthalten sind, wäre das Gefühl von Bernoulli richtig [...] Aber sobald die Zahl der Terme in dieser Gleichung unendlich wird, scheint es mir noch zweifelhaft, ob man sagen kann, dass die Kurve aus einer Unendlichkeit von Trochoiden zusammengesetzt sei: die unendliche Zahl scheint die Natur einer solchen Zusammensetzung zu zerstören.

Mit der Bemerkung „le sentiment de M. Bernoulli“ weist Euler darauf hin, dass Bernoulli seine Behauptung nicht beweisen kann. Dieses Gefühl ist für Euler nicht die Wahrheit [s.u.]. Das Zulassen von unendlich vielen Komponenten führt zudem auf eine logisch philosophische Schwierigkeit. Kann etwas Endliches unendlich viele Bestandteile haben? Leibniz beispielsweise postuliert gemäss Leisinger eine diskrete aus Monaden bestehende Welt und verweist das Kontinuum in das „ideale“ Reich des Denkens [Leisinger 1994, 93–94]. Demzufolge wäre er ein klarer Verfechter einer allgemeinen Quantentheorie oder ein Neupythagoreer, für den eine unendliche Reihe nur ein Gedankenspiel ist. Tatsächlich drängt sich aus Leibniz' Monadenbegriff eine wörtlich zu nehmende Atomtheorie auf. Dass beim Summieren von unendlich vielen Zahlen ein endliches Ergebnis herauskommen kann, ist für Euler kein Problem. Da aber die Zusammensetzung von unendlich vielen Teilen

ganz andere Eigenschaften als diejenigen ihrer Bestandteile haben kann, wirft die Natur einer solchen Zusammensetzung Fragen auf: Eine Überlagerung von unendlich vielen Sinusschwingungen kann gegen eine Dreiecksschwingung konvergieren. Die globale Differenzierbarkeit, eine mathematische Eigenschaft aller Teiltonkomponenten, gilt nicht für die im Grenzfall resultierende Dreiecksschwingung. Wenn hingegen nur endlich viele Teiltonkomponenten zugelassen sind, kann beim Summieren die Differenzierbarkeit nicht verloren gehen [vgl. Gibbs-Effekt, Kap. 8.1].

Euler gibt in diesem Zusammenhang ein Beispiel, bei dem die Überlagerung von unendlich vielen Sinustermen eine Funktion ergibt, die analytisch auf andere Art als endlicher Ausdruck beschreibbar ist [Euler 1755, 234]: Falls die Koeffizienten $\alpha, \beta, \gamma, \delta, \dots$ eine konvergierende geometrische Reihe bilden, lässt sich die zugehörige Funktion

$$y = \alpha \cdot \sin(\pi x / a) + \beta \cdot \sin(2\pi x / a) + \gamma \cdot \sin(3\pi x / a) + \dots \text{ mit } \alpha = c \cdot n, \beta = c \cdot n^2, \gamma = c \cdot n^3, \dots \text{ und } |n| < 1$$

auch als Quotient

$$y = c \cdot \frac{\sin(\pi x / a)}{1 - n \cdot \cos(\pi x / a)}$$

darstellen. Die Koeffizientenbestimmung ist fehlerhaft. Wenn man den Quotienten als Summe einer geometrischen Reihe interpretiert, erhält man (für n ungleich 0) dennoch *unendlich viele* nicht verschwindende *Teiltöne*. Der Zweck des Beispiels bleibt also trotz des Rechenfehlers gewahrt.

[...] l'équation nous offre une idée beaucoup plus simple de cette courbe, que si nous voulions dire, qu'elle étoit composée d'une infinité de trochoïdes TAYLORIENNES. [Euler 1755, 235]

[...] die Gleichung bietet uns eine viel **einfachere Idee von dieser Kurve**, als wenn wir sagen wollten, dass sie aus einer unendlichen Zahl von Taylorschen Trochoiden zusammengesetzt sei.

Die Frage nach der Einfachheit einer Schwingung ist damit gestellt. Allerdings aus einer rein mathematischen Perspektive. Ist eine unendliche Summe oder ein Quotient von Sinusschwingungen die einfachere Darstellung einer periodischen Funktion? Die Frage der Wahrnehmung scheint ausgeklammert. Mitzudenken ist wohl, dass sich die einfachere Idee auch der Wahrnehmung leichter erschliesse.

Euler geht dazu über, die Vorherrschaft der Sinusschwingungen zu hinterfragen. Partialschwingungen müssen keineswegs zwingend eine sinusförmige Gestalt haben:

Ce que M. Bernoulli a remarqué sur le mélange de deux ou plusieurs trochoïdes, est également applicable à toutes les autres courbes imaginable. Car quelle que soit la figure initiale de la corde AMB (Fig. 4), elle peut servir d'axe à d'autres figures semblable à plusieurs ventres. Dans ces cas le son total de la corde sera un mélange de plusieurs sons, dont l'un seroit l'octave, les autres la douzieme, la quinzieme, la dix-septieme et ainsi de suite. Ce mélange de sons rendus par une corde à la fois, que M. BERNOULLI a le premier si heureusement expliqué, n'est donc pas un effet si essentiel de la combinaison des trochoïdes TAYLORIENNES, qu'il ne puisse également être produit par un semblable combinaison d'autres

Was Bernoulli über die Mischung von zwei oder mehreren Trochoiden bemerkt hat, ist in gleicher Weise anwendbar auf alle denkbaren anderen Kurven. Wie auch immer die Anfangsgestalt der Kurve AMB sei, kann sie als Achse für andere ähnliche Figuren mit mehreren Bäuchen dienen. In diesen Fällen ist der gesamte Ton der Saite eine Mischung von mehreren Tönen, von denen einer die Oktave, die anderen die Dezim, die Quintdezim die Septdezim etc. sind. Dieses Gemisch von Tönen, das von einer Saite gleichzeitig hervorgebracht werden kann, das Bernoulli als erster so glücklich erklärt hat, ist also nicht ein derart wesentlicher Effekt der Kombination von Taylorschen Trochoiden, dass er

courbes quelconques. Et quand on fait réflexion à la manière, dont on est accoutumé de frapper les cordes, il est très probable qu'elles ne prennent jamais la figure des trochoïdes, ni qu'elles y approchent de plus en plus: puisque tous les phénomènes que M. BERNOULLI allègue, peuvent être également l'effet de toute autre figure quelconque. [Euler 1755, 252]

nicht genau so durch eine ähnliche Kombination beliebiger Kurven(formen) produziert werden könnte. Und wenn man die Art und Weise, wie man gewöhnlich die Saiten anschlägt, in Betracht zieht, ist es sehr wahrscheinlich, dass sie nie die Form von Trochoïden annehmen, noch sich ihnen immer mehr annähern: denn alle Phänomene die Bernoulli anführt, können genau so der Effekt von jeder anderen beliebigen Kurve sein.

Diese Überlegungen stellen die Sinusschwingungen als natürliche Bausteine der Töne in Frage, allerdings primär aus einer mathematisch-physikalischen und nicht aus einer wahrnehmungspsychologischen oder physiologischen Perspektive. Die Diskussion zwischen Ohm und Seebeck fast hundert Jahre später ist also in ihren wesentlichen Punkten bereits zwischen Bernoulli und Euler ausgefochten worden, vor allem wenn man in Betracht zieht, dass auch Ohm die physiologischen Implikationen seiner Auffassung kaum abgeschätzt oder gezogen hat. [Vgl. Kap. [4.1.3](#)]

Eulers Feststellung, dass beliebige Kurvenformen als Basis zur Herstellung periodischer Funktionen dienen könnten, ist meines Wissens unbeachtet geblieben. Überlegungen in ähnlicher Richtung von Thomas Young [1801] dürften davon unabhängig sein. Der konstruktive Beweis des Satzes von Fourier (1826), der die Berechnung der Amplituden (und Phasen) der Sinuskomponenten ermöglicht, dürfte entscheidend für den Durchbruch der Sinusschwingungen als kanonische Bausteine der Töne gewesen sein, denn eine vergleichbar einfache Berechnung der Amplituden für andere Schwingungsformen kann nicht gegeben werden.

Seebeck [1843, 1844] und Helmholtz [1863] werfen die Frage nach der richtigen Basis und der mathematischen Bequemlichkeit erneut auf. Helmholtz entscheidet sie, was auch nicht unproblematisch ist, aufgrund von Resonanzerscheinungen zugunsten der Sinusschwingung. [Vgl. Kap. [5.7](#)]

Die zitierten Passagen belegen, dass die Aussage des Theorems von Fourier schon vor seinem Beweis in der Diskussion um das Wesen der Töne eine entscheidende Rolle gespielt hat. Euler ist sich der allfälligen Konsequenzen bewusst:

Car si la considération de M. Bernoulli fournissoit toutes les courbes, qui peuvent avoir lieu dans le mouvement des cordes, il est certain qu'elle seroit infiniment préférable à notre méthode, qu'on ne pourroit plus regarder que comme un détour extrêmement épineux pour parvenir à une solution si aisée à trouver. [Euler 1755, 235]

Denn wenn die Betrachtung von Bernoulli alle Kurven, die in der Bewegung der Saite stattfinden können, erfasste, ist es gewiss, dass sie der unsrigen Methode unendlich vorzuziehen wäre, welche man nur noch als äusserst dornigen Umweg zu einer so leicht zu findenden Lösung betrachten könnte.

Dass der Satz noch nicht bewiesen werden kann, zwingt ihn zu der Einsicht, dass auch nicht sinusförmige Kurvenformen als Bausteine zur Generierung periodischer Klänge mittels additiver Synthese dienen könnten. Nichtwissen erweist sich hier als äusserst fruchtbar! Als Konsequenz dieser Auffassung thematisiert Euler in seinem Artikel *Eclaircissements plus détaillés sur la génération et la propagation du son et sur la formation de l'écho* von 1765 die von Tonhöhe und Lautstärke verschiedenen Qualitäten der Töne lösgelöst von jeglicher spektralen Interpretation [vgl. Kap. [3.3.4](#)].

3.1.7. Robert Smith: Periodizität der Saitenbewegung

Robert Smith, *Harmonics or the Philosophy of Musical Sound*, Cambridge 1749 [Smith 1749]

Wie das französische *son* ist das englische *sound* im Deutschen je nach Kontext mit „Schall“, „Klang“ oder „Ton“ zu übersetzen. Smith ist sich der Mehrdeutigkeit des Begriffs bewusst und differenziert, wo notwendig, zwischen *sound* und *musical sound* und er spricht von *musical string* und *body sounding musically*, wenn von Klängen oder Klangkörpern mit einer Tonhöhe die Rede ist. Das Charakteristikum eines solchen musikalischen Klangs ist die Isochronizität der Einzelschwingungen.

Therefore if several strings [...] or other sounding body vibrate all together in equal times, their sounds will have one and the same pitch, however they may differ in loudness or other qualities, and are therefore called Unisons: and on the contrary, the vibrations of unisons are isochronous. [...]
[Smith 1749, 4]

Wenn also mehrere Saiten [...] oder andere klingende Körper alle zusammen in gleichen Zeiten vibrieren, haben ihre Töne alle ein und dieselbe Tonhöhe – sie können sich aber in der Lautstärke und in anderen Qualitäten unterscheiden – und werden deshalb Einklänge genannt; und umgekehrt sind die Vibrationen von Einklängen isochron. [...]

Die Töne haben neben ihrer Tonhöhe und Lautstärke noch andere Qualitäten. Diese erlauben es, die gleichen Töne von verschiedenen musikalisch klingenden Körpern auseinanderzuhalten. Tonhöhe und Lautstärke sind beide dynamische Qualitäten, sie können sich im Verlaufe eines musikalischen Tons ändern:

Consequently the wider and narrower vibrations of a musical string, or any other body sounding musically, are all isochronous very nearly. Otherwise, while the vibrations decrease in breadth till they cease, the pitch of the sound could not continue the same; as by the judgment of the ear we perceive it does, if the first vibrations be not too large: in which case the sound is a little acuter at the beginning than afterwards. [Smith 1749, 5]

Folglich sind die weiteren oder engeren Vibrationen einer musikalischen Saite oder eine anderen musikalisch klingenden Körpers nahezu isochron. Sonst könnte, während die Vibrationen in ihrer Breite [Amplitude] abnehmen bis sie verschwinden, die Tonhöhe nicht die gleiche bleiben; was sie aber, wie wir durch das Urteil des Gehörs wahrnehmen, tut, wenn die ersten Vibrationen nicht zu gross sind: in welchem Fall der Ton am Anfang ein wenig höher ist als nachher.

Musikalische Töne entsprechen demnach periodischen oder nahezu periodischen Schallsignalen. Anhand der Saite weist Smith nach, dass die Bewegung der musikalischen Saite, nicht nur bei sinusförmiger Anfangsauslenkung (bei Vernachlässigung des Luftwiderstandes) periodisch ist. Seine Herleitung versteht die frei schwingende Saite aber nicht als Bewegung in mehreren Freiheitsgraden wie Daniel Bernoulli:

Coroll. 8. The small vibrations of a given musical chord are isochronous. For if the chord at the limit of its vibration assumes the form of the harmonical curve, it will vibrate to and fro in curves of that species by coroll. 7, and its several particles, being accelerated by forces constantly proportional to their distances from the base *AB* (*d*), will describe those unequal distances in equal times, like a pendulum moving in a cycloid.

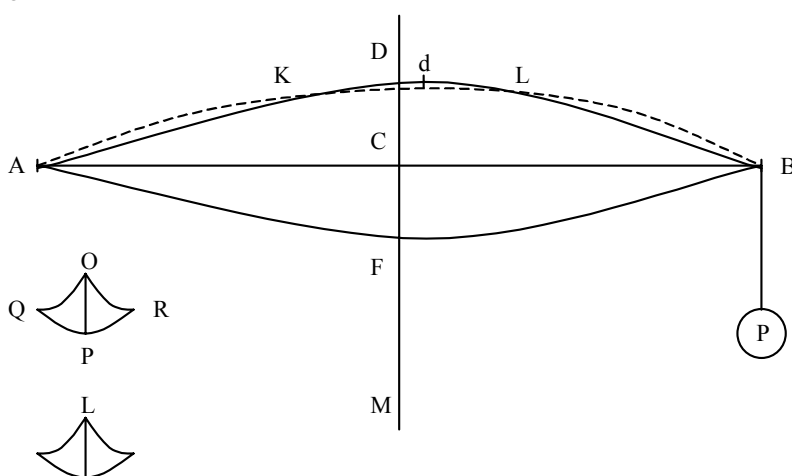
If the chord at the limit of its vibration assumes any other form, it will cut an harmonical curve, equal in length to it, in one or more points, as *A*, *K*, *L*, *B* in Fig. 54; and the intercepted parts of the

Korollar 8. Die kleinen Vibrationen einer beliebigen musikalischen Saite sind isochron. Denn wenn die Saite an der Grenze ihrer Vibration [bei maximaler Auslenkung] die Gestalt der harmonischen Kurve annimmt, wird sie sich gemäss Korollar 7 in Kurven dieser Art hin- und herbewegen, und ihre verschiedenen Partikel, die durch Kräfte beschleunigt werden, die konstant proportional zu ihren Auslenkungen sind, werden diese ungleichen Distanzen in gleichen Zeiten zurücklegen, wie ein Pendel, das sich in einer Zykloide bewegt. Wenn die Saite in ihrer Grenzlage eine andere Form annimmt, wird sie eine harmonische Kurve gleicher Länge in einem oder mehreren Punkten, wie *A*, *K*, *L*, *B* in Fig. 54, schneiden; und die

chord will be more or less incurvated towards AB than the corresponding parts of the curve, according as they fall without or within them; and will accordingly be accelerated by greater or smaller forces than those of the corresponding parts of the curve (e). Therefore, supposing the chord and curve to differ in nothing but their curvatures, the difference of the curvatures of the corresponding parts will be continually diminished by the difference of their forces, till the parts coincide either before, or when they arrive at the base AB . And thus the times of the several vibrations of the chord will be the same as those of the curve, and therefore equal to one another. [Smith 1749, 257-258]

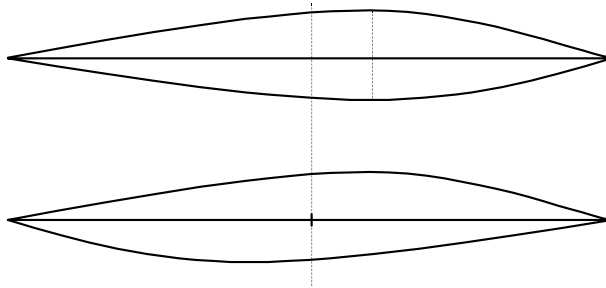
eingeschlossenen Teile der Saite werden mehr oder weniger gegen AB gekrümmt sein als die korrespondierenden Teile der Kurve, je nachdem sie innerhalb oder ausserhalb von ihnen verlaufen, und sie werden durch grössere oder kleinere Kräfte beschleunigt als die korrespondierenden Teile der Kurve. Wenn sich also die Saite und die Kurve in nichts ausser der Krümmung der korrespondierenden Teile unterscheiden, so wird der Unterschied der Krümmungen sich aufgrund der Differenz ihrer Kräfte stetig verringern, bis die Teile entweder vor oder wenn sie an der Basis AB ankommen, zusammentreffen. Und deshalb werden die Zeiten der verschiedenen Vibrationen der Saite, die gleichen sein wie diejenige der Kurven und folglich miteinander übereinstimmen.

Fig. 54.



Im zweiten Absatz des Zitats wird der Fall der beliebigen Anfangsauslenkung besprochen und bezüglich Periodizität auf denjenigen der harmonischen Schwingung zurückgeführt. Der Begriff der *harmonical curve* ist dabei unzweideutig als *figure of Sines*, d.h. Sinusbogen zu verstehen [Smith 1749, 258]. Ausgehend von der zur Auslenkung proportionalen Rückstellkraft im Falle der Sinusschwingung argumentiert Smith im allgemeinen Fall – ähnlich wie Taylor – mit Differenzen von Kräften und erweckt den Eindruck, als ob die harmonische Schwingung auf die nicht-harmonische eine Anziehungskraft ausübe. Es scheint implizit vorausgesetzt zu werden, dass die Nullage von allen Punkten simultan durchschritten wird. Eine Schwachstelle in Smiths Argumentation ist dabei, dass er die Möglichkeit eines Zusammengehens der Punkte der Saite mit der Referenzschwingung schon vor der Durchquerung der Nullage für möglich hält. In diesem Fall müsste nämlich die Zeit bis zum Nulldurchgang mit der Referenzschwingung deckungsgleich verlaufen, was eine Änderung des Bewegungstyps also eine Unstetigkeit in der Geschwindigkeitsfunktion der betreffenden Punkte der Saite bedeutet. Oder zumindest müssten die beiden Bewegungen, falls sie zwischenzeitlich wieder auseinanderlaufen zum Zeitpunkt des simultanen Nulldurchgangs erneut zusammenfinden. Es ist zu fragen, weshalb Smith überhaupt diese Differenzkräfte ins Spiel bringt. Da die Punkte der Saite anscheinend in Smiths Argumentation gegenseitig keine Wechselwirkung in Längsrichtung der Saite (Longitudinalkräfte) aufeinander ausüben, könnte er die einzelnen Punkte isoliert betrachten und käme automatisch auf den simultanen Nulldurchgang und die periodische Bewegung. Hätte Smith geschrieben „when they arrive at the base“ statt „either before, or when they arrive at the base“ wäre die Argumentation einleuchtender (für den Fall des simultanen

Durchgangs durch die Nullage), und sie führte zu einer periodischen Schwingung mit gleicher Frequenz wie die Referenzschwingung. In diesem Fall entstünden die verschiedenen Ortsbilder auseinander durch Streckung in Ordinatenrichtung und der Bewegungsverlauf nach dem Nulldurchgang verlief achsen- und nicht punktsymmetrisch:



Eulers Berechnungen [Kap. 3.1.6] zufolge ist der unten gezeichnete antisymmetrische Schwingungsverlauf die korrekte Auffassung. Die Zeichnung bei Smith lässt leider nicht mit Sicherheit erkennen, ob der obere oder untere Fall gemeint ist.

3.1.8. Tartini: Einheit in der Vielheit (1754)

Giuseppe Tartini, *Trattato di musica secondo la vera scienza dell' armonia*, Padova 1754, Reprint: Novecento, Palermo 1996 [Tartini 1754]

Die Begriffskombinationen „Einheit in der Vielheit“ und „Vielheit in der Einheit“ sind für die Philosophie von Gottfried Wilhelm Leibniz (1646-1716) zentral [vgl. Kap. 1.1.5]. Leibniz notiert am Rand eines Briefes von Eckhard aus dem Jahr 1677 [vgl. Leisinger, 136]:

Harmonia autem est unitas in multitudine

Harmonie ist Einheit in der Vielheit

Und in der *Monadologie* (1714) wird Vielheit in der Einheit als Wesensmerkmal der Monade bestimmt:

§12. Ausser dem Prinzip der Veränderung bedarf es einer besonderen Eigenart des sich verändernden Subjekts, die sozusagen die Besonderung und Mannigfaltigkeit der einfachen Substanzen bewirkt.

§13. Diese Besonderheit soll eine Vielheit in der Einheit oder in dem Einfachen einschliessen. Denn da sich jede natürliche Veränderung ohne Sprünge vollzieht, verändert sich etwas und etwas ruht. Und folglich muss es in der einfachen Substanz eine Mehrzahl von Bestimmungsmomenten und Beziehungen geben, obschon es keine Teile von ihr gibt. [zitiert nach Leisinger 1994, 136]

Monade ist für Leibniz gleichbedeutend mit einfacher Substanz. Eine Monade ist unteilbar und hat deshalb auch keine Ausdehnung. Trotzdem hat sie eine Mehrzahl von Bestimmungsmomenten. Ein Punkt in einem geometrischen Raum hat keine Ausdehnung. Seine Koordinaten können als seine Bestimmungsmomente aufgefasst werden. Ein Punkt kann als Modell einer Monade gelten. Das Phänomen der Obertöne führt Tartini [1754] zu Überlegungen, die mit dem Topos der „Vielheit in der Einheit“ in Verbindung gebracht werden können. Der Frage ob Tartini mit dem Denkansatz von Leibniz vertraut sein könnte, wurde nicht nachgegangen. Leisinger [1994] widmet dem Thema „Einheit in der Mannigfaltigkeit“ ein ganzes Kapitel [Leisinger 1994, 131-139].

La corda tesa sul monocordo (sia di minugia, o di acciaio) che per sé, come una, dovrebbe avere un

Die aufs Monochord gespannte Saite (sei sie aus Darm oder aus Stahl), die für sich, als eine

solo suono, ha chiaramente tre suoni; e sono il grave naturale della corda; ed altri due suoni acuti distinguibili, quali al suono della corda, come 1, sono come $1/3$, $1/5$; in numeri 15, 5, 3 [...] Dunque la corda, che per sé è una, si divide in se stessa armonicamente, perché 1 , $1/3$, $1/5$ è proporzione armonica. [Tartini 1754, 49]

einzig, nur einen Ton haben sollte, hat klar drei Töne; und sie sind der tiefe natürliche Ton der Saite und zwei andere unterscheidbare hohe Töne, welche zum Ton der Saite, als 1 wie $1/3$, $1/5$ sind; in ganzen Zahlen 15, 5, 3 [...] Die Saite also, die für sich eine ist, teilt sich in sich selbst harmonisch, denn 1 , $1/3$, $1/5$ ist eine harmonische Proportion.

Eine Saite bringt gleichzeitig mehrere Töne hervor. Erwähnt werden nur diejenigen der drei- und fünffachen Grundfrequenz. Sie entsprechen Schwingungen auf den entsprechenden ganzzahligen Teilen der Saite. Wie diese verschiedenen Unterteilungen gleichzeitig nebeneinander bestehen können, wird nicht hinterfragt.

La tromba marina, trombe da fiato, e corni di caccia sono di fenomeno uniforme. È fisicamente impossibile ne' suddetti strumenti aver altri suoni che quelli della serie armonica delle frazioni 1 , $1/2$, $1/3$, $1/4$ ecc. in infinito. [...] Ommettendo la ricerca della cagion fisica di tal effetto nelle trombe da fiato, e corni di caccia, si spiegarà la cagione della tromba marina, come fisicamente evidente. [Tartini 1754, 49–50]

Die Nonnengeige, die Trompete und die Jagdhörner zeigen die gleiche Erscheinung. Und es ist physikalisch unmöglich in den obgenannten Instrumenten andere Töne zu haben als diejenigen der harmonischen Reihe der Brüche $1, 1/2, 1/3, 1/4$ etc. ins Unendliche. [...] Die Erforschung des physikalischen Grundes eines solchen Effektes in der Trompete und in den Jagdhörnern weglassend, wird man die Ursache bei der Nonnengeige als physikalisch offensichtlich erklären.

Nonnengeige und Blasinstrumente zeigen die gleiche Erscheinung. Auch sie produzieren gleichzeitig mehrere Töne, und ihre Frequenzen sind ganzzahlige Vielfache der Grundfrequenz. Andere Frequenzen sind nicht möglich.

Soweit die Beschreibung der Phänomene, die schon Mersenne bekannt waren. Darüber hinaus werden Zusammenklänge, deren Frequenzen ganzzahlige Vielfache einer Grundfrequenz sind, als Einheit empfunden:

Le canne di organo rette da un pedale sono molte, sono tra loro di suono diverso, suonano tutte equitemporaneamente; e pure non si sente se non un solo suono, ch'è il gravissimo. La loro disposizione, o sia serie, è diversa secondo i diversi registri, ma sostanzialmente è armonica: essendo fisicamente impossibile ottenere da qualunque altra serie lo stesso intento. [Tartini 1754, 52]

Die Orgelpfeifen, die von einem Pedal gesteuert werden, sind viele und von verschiedener Tonhöhe, sie tönen alle gleichzeitig, und dennoch hört man nur einen einzigen Ton, nämlich den tiefsten. Ihre Anordnung oder Reihe ist verschieden je nach Register, aber sie ist wesentlich harmonisch. Denn es ist physikalisch unmöglich, mit irgendeiner anderen Reihe den gleichen Absicht zu erfüllen.

Eine solche Verschmelzung ist demnach auch möglich, wenn die Töne aus verschiedenen Schallquellen stammen. Der Zusammenklang hat dann *nur eine* Tonhöhe. Im folgenden Zitat wird die Einheit in der Vielheit bei mehreren Schallquellen explizit:

Data dunque una serie di canne di organo disposta ne' loro suoni armonicamente in tal modo: [Bsp.] suonando il pedale che regge tutte le canne suddette, non si sentirà se non il solo suono gravissimo C solfaut. Dunque in questo fenomeno il diverso è ridotto allo stesso, la molteplicità alla unità in forza della serie armonica. [Tartini 1754, 52–53]

Sei also eine Reihe von Orgelpfeifen, die in ihren Tönen auf solche Weise harmonisch angeordnet sind [...] wenn man das Pedal anschlägt, das die obgenannten Töne steuert, so wird man nur den einzigen tiefsten Ton C hören. In diesem Phänomen ist also, kraft der harmonischen Reihe, die Verschiedenheit auf die Gleichheit, die Vielzahl auf die Einheit reduziert.

Die additive Schallsynthese bei der Orgel wird ähnlich wie bei Rameau [1726, 1736, Kap. 3.1.3] beschrieben und theoretisch begründet. Der Grund weshalb das Gemisch von Tönen in einem Orgelklang als Einheit, als Ton mit einer einzigen Tonhöhe, empfunden werden kann, ist der gleiche wie beim Klang einer Saite. In beiden Fällen verschmilzt eine Vielheit zu einer Einheit. Notwendige Voraussetzung dafür ist gemäss dem vorangehenden Zitat, dass die Frequenzen der Teiltöne ganzzahlige Vielfache der Frequenz ihres tiefsten Tones sind. Die beiden Arten der Tonerzeugung sind für die Wahrnehmung äquivalent. Das erwartete Argument, die Gesamtperiodizität der überlagerten Schwingungen, kommt nicht, weil Tartini nicht in physikalischen Kategorien denkt und argumentiert.

Tartini diskutiert nicht, ob diese Art der harmonischen Partialtonverteilung zwingend zu einer einheitlichen Tonempfindung führt, oder ob auch Registerkombinationen (Amplitudenspektren) möglich sind, die eine solche Integration verunmöglichen. Ist die Dominanz des Grundtons als solche „notwendige“ Bedingung zu offensichtlich, um erwähnt zu werden?

Tartini beschreibt auch nicht, was eine (geringfügige) Abweichung von den harmonischen Frequenzverhältnissen für einen Einfluss auf das Wesen einer solchen Überlagerung haben könnte. Ist sie ein unreiner Ton oder zerfällt sie in mehrere separate Töne? Im Unterschied zu Rameau scheint Tartini nicht der Idee einer allgegenwärtigen Präsenz der harmonischen Partialtonreihe in allen klingenden Körpern anzuhängen.

Was aber durchschimmert, ist ein Zusammenhang zwischen der spektralen Zusammensetzung eines Tons und der Klangqualität. Deutet man den Begriff „Register“ als gleichbedeutend mit Klangqualität, kommt man Helmholtz' positiver Bestimmung der Klangfarbe schon sehr nahe: Die Klangqualität hängt ab von der Disposition der Teiltöne.

3.1.9. Mattheson: Ton-Klänge (1748)

Der Klang ist eine hörbare Substanz, die keinen Körper hat.

Aristoxeni iunior. Phtongologia systematica, Versuch einer systematischen Klang-Lehre,
Hamburg 1748, Nachdruck Bärenreiter Kassel 1981 [Mattheson 1748]

Man muß vielmehr das Wesen eines Dinges selbst, dessen Natur und Zufälle, so viel möglich, auf eine sowohl verneinende, als bejahende Art, fleißig untersuchen und unterscheiden. Vorher muß erörtert werden, was das Ding nicht sey; so wird desto besser erhellen, was es denn eigentlich sei? [Mattheson 1748, 31]

Mattheson erkennt die Notwendigkeit einer Klärung der musikalischen Grundbegriffe. Wer aber aufgrund des verheissungsvollen Titels *Phtongologia systematica, Versuch einer systematischen Klang-Lehre* eine physikalisch fundierte terminologische Systematik erwartet, wird etwas enttäuscht.

Bey dieser Gelegenheit ist denn das zusammengesetzte Kunst-Wort, *Ton-Klang*, zum sehr nothwendigen Unterschiede, aus fünf erheblichen Ursachen, alhier das erstemal eingeführet worden. Denn 1) kann man den Ausdruck, *Laut*, von jedem Geräusche und Getöse eben so wohl, als von der gemeinen Ausrede oder Sprache, brauchen. 2) Deuten zwar die Wörter, *Hall* und *Schall*, schon ein mehrers an; es läßt sich aber so eins als anders auf sehr viele Dinge ziehen, die nichts Ton- oder Gesang-mäßiges an sich haben. Jeder Schall ist kein Klang; jeder Klang aber ein Schall. [...] 3) Obgleich das Wort, *Klang*, der singenden Eigenschaft näher tritt, und es mit demselben, in allgemeinem Verstande, schon seine Richtigkeit hat; so begreift es doch, im besondern Verstande, noch keine eigentliche und bestimmte Dehnung, ist auch sonst mehrenteils nur von Instrumenten gebräuchlich. Hergegen gehet 4) das Wort *Ton* schon zu weit, und bemerkt bereits die Fortschreitung von einer Klang-Stufe in die andre nahegelegene [...].

Damit nun 5) die *gesangfähige Dehnung* eines einzelnen Klanges, ohne seine Vorgänger oder Nachfolger in Betracht zu ziehen, desto vernehmlicher anzeige, wird es am besten seyn, sich des Wortes *Ton-Klang* zu bedienen [...] [Mattheson 1748, 35-36]

Laut, Schall und *Hall* sind zu unbestimmt, für das was Mattheson vor Augen schwebt. *Klang* ist Unterbegriff von *Schall*, braucht aber keine Tonhöhe zu haben und ist nur auf Instrumente, nicht auf die Singstimme, anwendbar. Der Begriff *Ton* kommt nicht in Frage, weil er als Intervall des Ganztons missverstanden werden kann. Im Zentrum von Matthesons Interesse steht der Klang mit Tonhöhe als Individuum. Mit *Dehnung* ist nicht etwa die Dauer, sondern die Tonhöhe gemeint.

Was aber nun derselbe Ton-Klang eigentlich sey, und wie seine umschränkte Beschreibung oder *definitio* lauten müße? das ist eine große, in keiner Akustik, Physik noch Metaphysik, wohin die Sache doch gehöret, vielweniger in irgend einer Ton-Lehre, woselbst sie doch unentbehrlich fällt, bis itzo, so viel ich weiß, richtig und vollkommen beantwortete Frage. Das mag ein ungemeiner Mangel heißen: in einer Wissenschaft das *primum principium* nicht zu kennen! [Mattheson 1748, 38]

Was Mattheson der Musik als Wissenschaft vorwirft ist, dass sie ihren Grundbegriff nicht kennt und nicht einmal einen Begriff dafür hat. *Ton-Klang* ist für ihn der musikalische Grundbegriff:

Der Ton-Klang sey also ein geistiges unsichtbares Wesen, welches durch die allerzärtteste, innerliche Zusammenreibung der feinsten Theilchen eines dazu bequemen Werkzeuges rege gemacht, mittelst der äusern Luft zum Ohre geführt, und in der hörenden Seele empfunden wird. Kurz: Der Klang ist eine hörbare Substanz, die keinen Körper hat. Solches Aneinanderreiben und das darauf folgende Erzittern geschieht so heftig geschwind in einem gerührten, holen und dichten Wekzeuge, daß es kaum anders, als durch die bewegte leidende Luft, vermerket werden mag. [Mattheson 1748, 39]

Eine Bewegung ist eine Substanz ohne Körper. Da sie keinen Körper hat, ist sie geistig. Die Bewegung, die den Ton-Klang im klingenden Körper verursacht, kann nicht gesehen werden. Die sich passiv verhaltende Luft nimmt diese Bewegung auf und teilt sie dem Gehör mit. Auge und Ohr haben für Mattheson einen völlig andern Stellenwert. Der Sehsinn registriert auf objektive Weise die materiellen Gegenstände und nur diese. Das Gehör aber, das die Wirkung einer Bewegung rezipiert, nimmt dadurch geistige Entitäten wahr.

Dieser ätherische Ton-Klang, so zu reden, wird also vom Anschlage, oder von der Berührung hervorgebracht, in dem Verstande, als man von einer Nachtigall, oder von einem musikalischen Instrumente, das Wort Anschlagen braucht. Von der Bewegung wird er herausgeführt; von der umherfließenden Luft aufgenommen, und fürs erste den Spannaden des Gehörs zugetragen, deren jede zween Zweige, einen harten und einen weichen hat: vermuthlich hohe oder scharfe, und tiefe oder stumpfere Klänge, mit Unterschiede, zu vernehmen und zu empfinden. Drey Umstände sind hiebey wohl zu beobachten: was thätig anschlägt; was leidend angeschlagen oder in Bewegung gesetzt wird; und wie dasselbe in der That wirkt. Denn wir können kein geistig Wesen anders, als aus der Wirkung, erkennen: *a parte post*. [Mattheson 1748, 39-40]

Geistige Wesen können nur aus ihrer Wirkung erkannt werden. Körperliche Objekte demgegenüber werden unmittelbar erkannt. Insbesondere scheint für den Sehsinn kein Zeitverzug notwendig zu sein. Die Beschreibungen Matthesons sind zwanglos auf beliebigen *Schall* anwendbar. Insofern gelingt es ihm selbst auch nicht, das musikalische *primum principium* zu definieren.

Drei Aspekte sind bemerkenswert:

- Mattheson geht von einem dreigeteilten Kommunikationsmodell mit den Instanzen Sender, Medium und Empfänger aus. Das Kommunikationsmodell gilt aber nur für das Gehör, und nicht für den Sehsinn.

- Ferner formuliert er eine primitive Ortstheorie der Frequenzverarbeitung: verschiedene Tonhöhen werden im Gehör an verschiedenen Orten weiterverarbeitet.
- Die Tonhöhendimension ist mit Qualitätsmerkmalen gekoppelt: „hoch = scharf“ und „tief = stumpf“.

Ulrich Leisinger interpretiert Matthesons Lehre der Ton-Klänge als „merkwürdigsten Niederschlag“ [Leisinger 1994, 99] von Leibniz' Monadenlehre. Der Ton-Klang wird als Monade gedeutet. Man könnte deshalb versucht sein, Mattheson in gedankliche Nähe zu Tartini zu rücken. Wichtig in diesem Zusammenhang ist die in folgender Belegstelle formulierte Unteilbarkeit der Ton-Klänge:

Dieses vermuthlich geistige Wesen des Ton-Klanges nimmt ihn demnach von aller meßfähigen Eigenschaft, Zahl und Größe gänzlich aus, weil er untheilbar ist und bleibt. Man könnte ihn vielleicht, vergleichungsweise, einen schallenden Meßpunct, oder aber eine klingende Einheit nennen: weil aus ihm alle musikalischen Intervalle oder Distanzen ihr Dasein fast ebenso erhalten, als wie aus jenen alle Linien und Zahlen entstehen. Aristides Quintillian heisset den Ton-Klang, ohne Zweifel in besagter Absicht, den allerkleinsten Theil der Stimme*).

*) Minimam vocis partem [Mattheson 1748, 46]

Leisingers Zitat endet vor dem Verweis auf Quintilian. Ein expliziter Bezug auf die Monadenlehre findet sich bei Mattheson erst 1755 in „Plus Ultra“ III [479-480] [zitiert in Leisinger 1994, 107], und der ist ablehnend. Eine nicht datierbare Randnotiz in Matthesons Handexemplar der „Grundlage einer Ehren-Pforte“ (1744) erwähnt Leibniz in einem anderen Zusammenhang [Leisinger, 106]. Falls Mattheson in der „Phtongologia“ bewusst das Gedankengut von Leibniz aufgegriffen haben sollte, gibt er es jedenfalls nicht zu erkennen. Die Analogie zu den geometrischen Punkten lässt sich auch auf antikes Gedankengut (Euklid, Aristoxenos) beziehen. Der Ton-Klang als masseloses Elementarteilchen ist andererseits auch eine ganz moderne Vorstellung: Man denke etwa an die Photonen in der Optik oder das akustische Pendant, die Phononen der theoretischen Physik.

3.1.10. Diderot: Tonhöhe, Lautstärke, Gleichförmigkeit (1748)

Denis Diderot, *Mémoires sur différents sujets de mathématiques*, Paris Durand 1748, Première mémoire: Principes généraux d'acoustique in: Denis Diderot Oeuvres complètes, Edition chronologique, Le Club Français du Livre, 1969 [Diderot 1748]

Diderots Beschreibung der Schallübertragung und Schallwahrnehmung ist ähnlich wie bei Mattheson, aber mit physikalischen Begriffen:

Les vibrations d'une corde produisent des ondulations dans l'air. L'air agite le tympan. Le tympan transmet son frémissement aux nerfs auditifs; et les nerfs auditifs ne font peut-être que répéter les vibrations de la corde. Cela supposé, l'oreille est un vrai tambour de basque. Le tympan représente la peau. Les nerfs auditifs répondent à la corde qui traverse la base; et l'air fait l'office des baguettes ou des doigts. [Diderot 1748, 33]

Die Vibrationen einer Saite produzieren Wellen in der Luft. Die Luft bewegt das Trommelfell. Das Trommelfell überträgt sein Erzittern auf die Hörnerven; und die Hörnerven machen vielleicht nichts anderes als die Vibrationen der Saite zu wiederholen. Dies vorausgesetzt ist das Ohr ein wahres Tamburin. Das Trommelfell stellt die Haut dar. Die Hörnerven entsprechen der Saite, welche die Basis überquert, und die Luft erledigt die Aufgabe der Schläger oder Finger.

Die Stationen der Schallübertragung sind: Schwingung der Saite, Welle in der Luft, Schwingung auf dem Trommelfell, Übertragung auf die Hörnerven. Die ganze Übertragungskette beruht auf Resonanz und mechanischer Übertragung. Der Hörnerv entspricht der Schnarreseite, einer der vielen Sonderbedeutungen des französischen *timbre*. Die beschriebene Analogie gibt auch eine Erklärung für die vor allem im Französischen bei der Definition der Töne gebrauchte Wendung „battements de l'air“, die Luft wird durch die schwingende Luft geschlagen, und die Luft schlägt das Trommelfell. Töne haben drei charakterisierende Eigenschaften: Tonhöhe, Lautstärke und Isochronizität. Die Tonhöhe entspricht der Frequenz und diese muss – mit Referenz auf Euler – zwischen bestimmten Grenzen (30 – 7552 Hz) liegen [Diderot 1748, 33].:

Die Lautstärke wird auf zweierlei Weise bestimmt.

La distinction des sons en graves et en aigus n'est pas la seule qu'on puisse faire. On les considère encore comme forts et faibles. La force du son varie selon la distance au corps sonore. Il en est du son comme de la lumière, et en général de tout ce qui émane d'un point considéré comme centre. [...] et cet affaiblissement suit ordinairement la raison des carrés des distances; [Diderot 1748, 38]

Die Unterscheidung der Töne in tiefe und hohe ist nicht die einzige, die man machen kann. Man unterscheidet sie noch als starke oder schwache. Die Stärke des Tons variiert entsprechend der Entfernung des klingenden Körpers. Es ist beim Ton wie beim Licht und bei allem, was von einem als Zentrum angesehenen Punkt ausgeht [...] und diese Abschwächung erfolgt gewöhnlich im Verhältnis der Quadrate der Entfernungen.

Sie hängt ab von der Entfernung zur Schallquelle (wie bei Mersenne). Sie bezieht sich also auf den Ort des wahrnehmenden Subjekts. Sie hängt ferner ab von der Auslenkung:

Les excursions d'une corde au-delà de la ligne de repos peuvent être plus ou moins grandes, sans augmenter ni diminuer en nombre dans un temps donné; c'est là ce qui rend le son plus ou moins fort, sans changer son rapport à un autre son plus ou moins grave. [Diderot 1748, 38]

Die Auslenkungen einer Saite aus der Ruhelage können mehr oder weniger gross sein, ohne in ihrer Anzahl zu einer gegebenen Zeit zu- oder abzunehmen. Das ist, was den Ton mehr oder weniger stark macht, ohne sein Verhältnis zu einem andern mehr oder weniger tiefen Ton zu ändern.

Zur Isochronizität schreibt Diderot:

J'entends, par un son uniforme, celui qui est pendant toute sa durée également grave ou aigu. Si l'on veut qu'un son soit uniforme, ou garde en s'éteignant le même rapport à un son donné que celui qu'il avait en commençant, il faut que les vibrations qui fixent son degré soient isochrones; et pour cet effet, la corde doit être suffisamment tendue, et le coup dont elle est frappée, modéré. Sans ces deux conditions, elle s'écartera sensiblement de la ligne de repos; ses premières vibrations seront plus promptes que les suivantes; aussitôt le son ne sera plus uniforme, et l'oreille se révoltera.

Le chagrin de l'organe naît de ce que le défaut d'isochronisme dans les vibrations, rendant le rapport d'un son variable, il ne sait en quelle raison ce son qui le frappe est à celui qui le précède, l'accompagne ou le suit. Ce qui démontre que le plaisir musical consiste dans la perception des rapports des sons. [Diderot 1748, 38–39]

Ich verstehe unter einem gleichmässigen Ton, einen, der während seiner ganzen Dauer gleich tief oder hoch ist. Wenn man will, dass ein Ton gleichmässig ist, oder dass er im Verklingen zu einem gegebenen Ton das gleiche Verhältnis behält, das er am Anfang hatte, ist notwendig, dass die Vibrationen, die seine Tonhöhe bestimmen, isochron sind. Und für diesen Effekt muss die Saite genügend gespannt sein und der Schlag, mit dem sie angeschlagen wird, gemässigt. Ohne diese beiden Bedingungen entfernt sie sich wahrnehmbar von der Ruhelage. Ihre ersten Vibrationen sind schneller als die folgenden. Ebenso ist der Ton nicht mehr gleichmässig und das Ohr rebelliert. Das Missbehagen des [Hör-]Organs kommt davon, dass es, weil der Mangel an Isochronizität in den Vibrationen den Bezug eines Tons veränderlich macht, nicht weiss, in welchem Verhältnis dieser Ton, der es schlägt, zu demjenigen, der ihm vorangeht, der ihn begleitet oder ihm folgt, steht. Was beweist, dass das

musikalische Vergnügen aus der Wahrnehmung der Verhältnisse der Töne besteht.

Falls die einzelnen Schwingungen *isochron*, in gleichen Zeitabständen erfolgen, hat ein Ton eine konstante Tonhöhe. Dies ist notwendig dafür, dass er in einem klar definierten Bezug zu seinem Kontext steht.

Der Ton hat in der Wahrnehmung verschiedene charakteristische Eigenschaften, die alle auf physikalische Eigenschaften der Schwingungen zurückgeführt werden:

Il y a donc trois choses à considérer dans les vibrations: leur étendue qui fait l'intensité ou la véhémence du son; leur nombre qui le rend plus ou moins aigu; et leur isochronisme d'où dépend son uniformité. [Diderot 1748, 39]

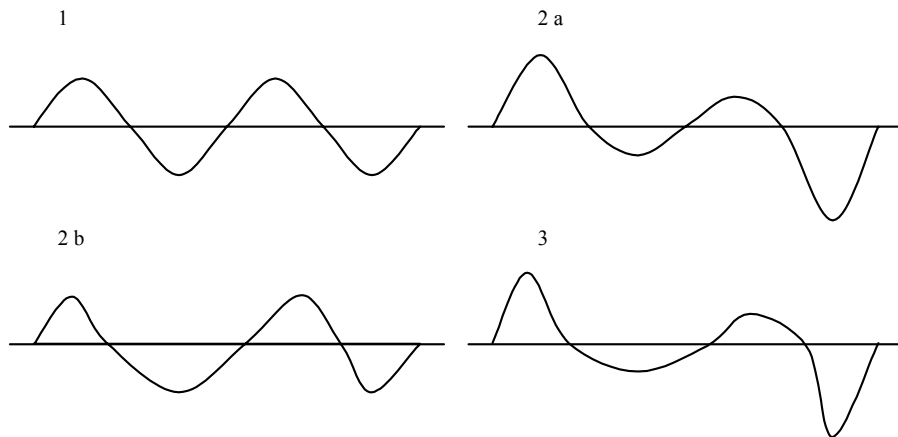
Es gibt also in den Vibrationen drei Sachen zu betrachten: ihre Weite, welche die Stärke oder Heftigkeit des Tons bewirkt, ihre Zahl, die ihn mehr oder weniger hoch macht, und ihre Isochronizität von der seine Gleichförmigkeit abhängt.

Die drei Eigenschaften beschreiben einen Ton vollständig. Eine nähere Bestimmung eines Tones von konstanter Lautstärke und konstanter Tonhöhe gibt Diderot allerdings nicht. Dies könnte auf verschiedene Weise gedeutet werden:

- Der Ton wird implizit als Sinusschwingung vorausgesetzt. Eine Abweichung von der Sinusgestalt besteht aus mehreren Tönen.
- Die Gestalt der Schwingung spielt für die Wahrnehmung keine Rolle: eine Dreiecksschwingung wäre also von einer Sinusschwingung gleicher Lautstärke und Tonhöhe nicht zu unterscheiden.
- Durch Veränderung der Isochronizität (Verschiebung der Nulldurchgänge) und durch Variation der Auslenkung im Mikrozeitbereich kann aus einer periodischen Schwingung beliebiger Gestalt jedes denkbare Schallsignal erhalten werden.

Der erste Erklärungsansatz scheint für Diderot eher unwahrscheinlich, da er nicht mit dem aktuellen Stand der Diskussion zwischen Euler und Daniel Bernoulli vertraut ist. Der zweite ist nicht auszuschließen. Es ist aber zu bedenken, dass Diderot, anders als de Mairan und Rameau von einer vollständig „analogen“, wellenbasierten Übertragungskette ausgeht. Das Trommelfell ist demnach nicht einem Schallteilchenregen ausgesetzt, der eine differenzierte Weiterverarbeitung verunmöglicht, sondern es registriert den Effekt einer Welle in Form einer Schwingung. Das Gehör könnte also durchaus in der Lage sein, verschiedene Schwingungsformen zu unterscheiden.

Die dritte Möglichkeit erhält, obschon sie in anachronistischer Weise elektrotechnische Begriffe an den Text heranträgt, eine gewisse Plausibilität, wenn man davon ausgeht, dass Diderots Blick zum Zeitpunkt des Verfassens gerade nicht durch die Obertonproblematik und Superpositionsfrage voreingenommen ist.



Der Übergang von 1 nach 2a stellt eine zeitabhängige Veränderung der Auslenkung dar, derjenige von 1 nach 2b eine Veränderung der Isochronizität durch Verschiebung der Nulldurchgänge auf der Zeitachse. Der Übergang von 1 nach 3 ist eine Kombination der beiden Modifikationen. Auf diese Weise können beliebige Kurvengestalten mit gleicher Zahl von Nulldurchgängen erhalten werden.

Beliebige zeitabhängige Veränderung von Auslenkung und Frequenz sprengen den Rahmen dessen, was von Diderot unter Ton verstanden wird. Zu fragen wäre also nach den Schranken der Frequenz- und Amplitudenvariation, innerhalb welcher eine einheitliche Tonempfindung möglich ist.

Abweichungen von der Isochronizität werden von Diderot als dem Zweck der Musik zuwiderlaufend angesehen. Demzufolge müsste dem Vibrato jeder künstlerische Wert abgesprochen werden. Denn Vibrato ist nichts anderes als eine Form der Anisochronizität [vgl. Rousseau, Kap. 3.3.3] und die Uneinheitlichkeit der Tonhöhe steht dem Erfassen der Beziehungen entgegen. Diderot scheint Descartes' Auffassung im *Compendium* nahe zu stehen. Die Aufgabe der von Tonhöhen- und Zeitverhältnissen verschiedenen Aspekte der Musik bleibt undefiniert. Dies zu einer Zeit, in der Instrumentierung und Dynamik zunehmend Bedeutung erlangen!

Alle von der Tonhöhe und Lautstärke verschiedenen Eigenschaften der Töne sind Störungen des *Isochronisme*. Die Klangfarbe kommt als eigenständiges Moment bei Diderot nicht vor. Diesbezügliche Unterschiede können mit seinem reduktionistischen Ansatz nur als Defizit erklärt werden. Sie sind Ausdruck einer mehr oder weniger grosse Abweichung vom Ideal maximaler Glattheit.

Wenn Diderot mit Isochronismus nur Periodizität meinte, dann wäre die Unterscheidung in drei Eigenschaften des Tons hinfällig und wir wären bei der Definition des Sinustons, der mit den beiden Merkmalen Frequenz und Amplitude vollständig beschreibbar ist. Isochronismus ist eine dynamische Eigenschaft, die ein Ton mehr oder weniger haben kann und sie ist über den Zeitverlauf eines Tons variabel.

3.1.11. Rousseau: Tonhöhe, Lautstärke, Timbre (1768)

Rousseau schreibt im Artikel *SON* des *Dictionnaire de Musique*:

Quand l'agitation communiquée à l'air par la collision d'un corps frappé par un autre, parvient jusqu'à l'organe auditif, elle y produit une sensation qu'on appelle *Bruit* (Voyez BRUIT.) Mais il y a un *Bruit* résonnant et appréciable qu'on

Wenn die der Luft durch die Kollision eines Körpers, der durch einen andern angeschlagen wird, mitgeteilte Erregung zum Hörorgan gelangt, bewirkt sie dort eine Empfindung, die man *Bruit* nennt (siehe BRUIT). Aber es gibt einen

appelle *son*. Les recherches sur le *son* absolu appartiennent au Physicien. Le Musicien n'examine que le *son* relatif; il l'examine seulement par ses modifications sensibles, & c'est selon cette dernière idée, que nous l'envisageons dans cet article. [Rousseau 1768, 438-439]

klingenden und angenehmen *Bruit*, den man *Ton* nennt. Die Forschungen über den absoluten *Ton* gehören dem Physiker. Der Musiker untersucht nur den bezogenen *Ton*, er untersucht ihn nur durch seine wahrnehmbaren Modifikationen, und gemäss dieser letzten Idee betrachten wir ihn in diesem Artikel.

Die Passage ist im Vergleich zur korrespondierenden Stelle in der *Encyclopédie* leicht überarbeitet und präziser. Vom musikalischen Standpunkt interessieren nur diejenigen Eigenschaften eines Tones, die ihn für die Wahrnehmung von andern Tönen unterscheidbar machen. Diese Eigenschaften lassen sich innerhalb von bipolaren Kategorien durch ein Mehr oder Weniger charakterisieren. Deshalb ist die musikalische Betrachtungsweise relativ:

Il y a trois objets principaux à considérer dans le *son* ; le Ton, la force & le tymbre: Sous chacun de ces rapports le *son* se conçoit comme modifiable: 1°. du grave à l'aigu: 2°. du fort au foible: 3°. de l'aigre au doux: ou du sourd à l'éclatant, & réciproquement. [Rousseau 1768, 439]

Es gibt drei hauptsächlich Dinge im Ton zu betrachten; die Tonhöhe, die Kraft und das Timbre: Unter jeder dieser Beziehungen ist der Ton als veränderlich zu verstehen: 1° von der Tiefe zur Höhe, 2° vom Starken zum Schwachen, 3° vom Sauren (Bitteren) zum Süßen oder vom Dumpfen zum Hellen und umgekehrt.

Es ist nicht auszuschliessen, dass Töne, die sich in der Wahrnehmung, insbesondere in den genannten Apekten, nicht unterscheiden, bei einer physikalischen Untersuchung (wie der Aufzeichnung des Schalldruckverlaufs) sehr wohl verschieden sein können. Die Wahrnehmung steht nicht a priori im Verhältnis 1 : 1 zu den verursachenden Schwingungen. Rousseaus Formulierung im oberen Zitat („par ses modifications sensibles“) lässt durchaus Raum für prinzipielle Inkongruenzen. So liesse sich die Unempfindlichkeit für Phasenrelationen zwanglos einordnen.

Vergleichend mit Diderots Definition, die im Ton ebenfalls drei zentrale Eigenschaften postuliert, ist nur *isochronisme* durch *tymbre* ersetzt. Im physikalischen Teil des Artikels *SON* der *Encyclopédie* (nicht von Rousseau) steht hingegen an dritter Stelle die Dauer [344 Sp. 1]. Ist demnach für Rousseau die Klangfarbe eine Funktion der Isochronizität? Folgende Stelle gibt darauf partiell Antwort:

Quand la corde est assez tendue, & qu'on ne force pas trop la voix ou l'instrument, les vibrations restent toujours isochrones; & par conséquent, le ton demeure le même; soit qu'on renfle ou qu'on affoiblisse le *son*: mais en raclant trop fort de l'archet, en relâchant trop la corde, en soufflant ou criant trop, on peut faire perdre aux vibrations l'isochronisme nécessaire pour l'identité du Ton; [Rousseau 1768, 444]

Wenn die Saite genügend gespannt ist und wenn man die Stimme oder das Instrument nicht zu stark forciert, bleiben die Vibrationen immer isochron; und folglich bleibt die Tonhöhe die gleiche, ob man den *Ton* anschwellen oder abklingen lässt. Aber wenn man den Bogen zu stark streicht, die Saite zu stark lockert oder wenn man zu stark bläst oder schreit, können den Vibrationen die für die Identität der Tonhöhe notwendige Isochronizität verloren gehen.

Isochronizität erscheint hier primär als Funktion der Spielstärke. Ihr Fehlen zerstört die Identität der Tonhöhe und damit das Wesen des Tons. Nicht isochrone Schallsignale fallen demnach eher unter den Begriff *bruit*. Einen direkten Zusammenhang zur Klangfarbe scheint Rousseau nicht zu sehen. Liest man allerdings die Fortsetzung der obigen Passage, die ihm nebenbei dazu dient, gegen die französische Singkunst zu polemisieren, könnte man einen Zusammenhang zwischen *isochronisme* und *douceur* vermuten:

& c'est une des raisons pourquoi, dans la Musique Française, où le premier mérite est de bien crier, on est plus sujet à chanter faux que dans

Und dies ist einer der Gründe, warum man in der französischen Musik, wo es das erste Verdienst ist, gut zu schreien, man eher dem Falschsingen

l'Italienne, où la voix se modere avec plus de douceur. [Rousseau 1768, 444]

unterliegt als in der italienischen, wo sich die Stimme mit mehr Süßigkeit mässigt.

Douceur bezieht sich in diesem Zitat nicht nur auf die Lautstärke, da dies bereits durch die Mässigung ausgedrückt ist [vgl. auch Kap. [3.3](#), *aigre – doux*].

Es fällt auf, dass *tymbre* bei seiner ersten Nennung im *Dictionnaire* klein geschrieben ist. Nach Rousseaus typographischem Avertissement [1768, xi] könnte man also vermuten, dass der Begriff keiner wesentlichen Mehrdeutigkeit unterliegt, eine Unterscheidung zwischen Alltagsgebrauch und fachsprachlicher Anwendung des Begriffs sich demzufolge noch nicht aufdrängt. Eine andere Deutung: *tymbre* ist für Rousseau noch kein Terminus technicus. Dem widerspricht die Grossschreibung in der Folge des Artikels. Die Ausgabe 1885 hat Rousseaus differenzierte Typographie in groß vs. klein und kursiv vs. rektal wieder aufgegeben. Sie verwendet innerhalb eines Artikels mit Ausnahme von Querverweisen konsequente Kleinschreibung. (Die Verwendung des zu definierenden Fachbegriffs innerhalb des zugehörigen Artikels XXX steht dort in Kursivschrift xxx, und es gibt nur noch eine Form der Kursivschrift.)

3.1.12. Erleben (1777)

Erlebens *Naturlehre* war, aus ihren zahlreichen Auflagen im 18. Jahrhundert zu schliessen, ziemlich beliebt, heute aber vergessen. Sie gibt eine Einführung zu allen Themen der Physik in leichtverständlicher Sprache. Die Auffassung Erlebens über die zusammengesetzte Natur des Klangs wird von Chladni wiederholt kritisiert [Chladni 1787; 1802; Kap. [3.4.1](#)]. Erlebens Abgrenzung von Schall und Klang wird in Kap. [3.2.7](#) besprochen.

§291. Ein in der Musik vorzüglich geübtes Ohr empfindet es deutlich, daß kein Klang so einfach ist, als es einem weniger geübten scheinen könnte, sondern daß in jedem Klange vielmehr alle Töne gewissermassen mit klingen: vorzüglich aber hört man ausser dem Grundtone allemahl noch die Octave desselben, die Octave der Quinte und die doppelte Octave der grossen Terze. Die Reinigkeit eines Klanges und sein Unterschied von einem andern Schalle oder Geräusche scheint also nicht sowohl darinn zu bestehen, daß er ganz einfach und ungemischt ist, oder daß die Luft bloß Schwingungen von einerley Geschwindigkeit dabey bekömmt; sondern daß vielmehr der eigentliche Grundton, und nach ihm die Consonanzen alle übrigen unangenehmern Töne hinlänglich überwiegen; so wie auch unstreitig die Theilchen der Saite bey der Erschütterung derselben mit ganz verschiedenen Geschwindigkeiten zittern müssen ungeachtet die Saite im Ganzen nur einerley Schwingung hat. Gewisse Register der Orgel dienen sehr gut zur Erläuterung dieser Sache. [Erleben 1777, 228-229]

Grundsätzlich sind in einer Schallquelle beliebige gleichzeitige Töne möglich. Falls die vorherrschenden Töne (paarweise) konsonant sind, spricht man von einem Klang. Die Formulierung lässt offen, ob die Teiltonfrequenzen ganzzahlige Vielfache der Frequenz des Grundtons sein müssen. Auch ist unklar, ob ein Tongemisch, bei dem nur ein Ton wahrnehmbar ist, in einem klingenden Körper möglich ist und ob darauf der Begriff Klang noch anwendbar wäre.

Erleben scheint nicht klar zwischen der Geschwindigkeit der Teilchen und ihrer Schwingungsfrequenz zu unterscheiden. Die Saite macht gesamthaft gesehen nur eine Schwingung. Dennoch produziert sie mehrere gleichzeitige Töne, denn die Teilchen zittern seiner Auffassung zufolge mit verschiedener Geschwindigkeit, das heisst die verschiedenen Töne entstehen an verschiedenen Stellen auf der Saite. Deutet man dabei *Geschwindigkeit* als *Frequenz*, erhält man zwar verschiedene Töne, aber einen Widerspruch zur einheitlichen Gesamtbewegung der Saite. Die durchschnittliche Geschwindigkeit der Punkte der Saite ist an den Enden der Saite kleiner als an den Orten maximaler Auslenkung, die Frequenz jedoch ist

überall die Gleiche. Deutet Erxleben die Geschwindigkeit und nicht die Frequenz als tonhöhenbestimmend, so erhält er für jede klingende Saite ein kontinuierliches Klangspektrum, und die Aussage, dass „in jedem Klange vielmehr alle Töne gewissermassen mit klingen“ erhält Sinn. Wie in diesem Frequenzgemisch die Konsonanzen dominieren können, bleibt allerdings unklar. Chladni [1887, 66 (Fussn.)] vermutet, Erxleben unterliege hier dem gleichen Irrtum wie de la Hire [vgl. Kap. [3.1.2](#)].

3.2. Ton und Geräusch

Matthesons Maxime befolgend, wird hier der Wesensbestimmung des Tones durch Abgrenzung gegen seinen Widersacher nachgegangen. Für Geräusche scheint es in dieser Zeit viel naheliegender einen Zusammenhang zwischen ihrer Eigenart und ihrer spektralen Zusammensetzung zu erkennen (de Mairan, Rousseau, Erxleben) als bei Klängen. De Mairans und Erxlebens Deutungen scheinen auf der Vorstellung von a priori kontinuierlichen Klangspektren zu basieren. Ihre Auffassungen resultieren aus dem Vergleich von Schall und Licht, allerdings unter verschiedenen Vorstellungen über die Übertragungsmechanismen. Rousseau gelangt auf Grund akustisch psychologischer Überlegungen ebenfalls zu einer spektralen Interpretation. Diderot macht für Geräusche die Abweichung ihrer Schwingungen von der Isochronizität geltend und versteht diese als einfach im Unterschied zu den aus Teiltönen zusammengesetzten Klängen. Auch bei Erxleben ist neben der spektralen Sicht die Abweichung von der Periodizität für „schallende“ aber „nicht klingende“ Körper auszumachen. Sulzer gibt einem einfachen, nicht zusammengesetzten Ton Geräuschcharakter.

Bei Sauveur [1700] und Smith [1749] werden Schwebungen erstmals Grundlage einer physikalistischen Konsonanztheorie. In beiden Fällen findet sich kein Bezug auf Obertöne. Schwebungen sind die Ursache des Dissonanzempfindens. Ihre Abwesenheit garantiert eine glatte, ungestörte Klangempfindung. Eine solche ist nur bei Einzeltönen und Konsonanzen mit einfachem Grundfrequenzverhältnis möglich.

Smith der den Bericht *Sur la détermination d'un son fixe* zu Sauveur in der *Histoire de l'Académie Royale des Sciences* von 1700 zitiert und kritisiert, scheint die umfassendere Arbeit *Principes d'acoustique et de musique ou système général des intervalles des sons* Sauveurs von 1701, die sich mit dem Obertonphänomen, den Schwingungsknoten und Schwingungsbäuchen befasst, nicht zu kennen. Smith zitiert auch einen Brief von Wallis aus den *Transactions of the Royal Society* von 1698, nicht aber „Dr. Wallis's Letter to the Publisher, concerning a new Musical Discovery“ [Wallis 1677], der das Phänomen der Schwingungsknoten erstmals einer breiteren Öffentlichkeit bekannt machte [vgl. Kap. [2.5.4](#)]. Vertrautheit mit einem der beiden Texte hätte Smiths Schwebungstheorie eine andere Dimension verleihen können. Die Vorstellung von den Schwingungen in der Schallquelle, die periodische Luftpulse verursachen, welche ihrerseits zu diskreten Zeitpunkten auf das Trommelfell aufschlagen, scheint ein adäquates Verständnis der Superposition von Tönen zu erschweren. Sowohl Sauveur [1700] als auch Smith sind von dieser Modellvorstellung geleitet. Smith verwendet zur Visualisierung von überlagerten Zusammenklängen Strichmuster – ähnlich den periodischen Punktmustern in Eulers *Tentamen* [1737] –, die physikalisch als überlagerte Nadelimpulsschwingungen deutbar sind.

3.2.1. Sauveur (1700)

Sur la détermination d'un son fixe. Histoire de l'Académie Royale des Sciences. Année 1700, Seconde Edition, revue, corrigé & augmentée, Chez Pierre Mortier, Amsterdam 1734, 182-195 [Sauveur 1700]

Donc les cordes d'un ton grave ont plus de quantité du mouvement, & en impriment plus à l'Oreille, mais les coups qu'elles lui portent sont moins serrés, &, pour ainsi dire, moins appuyés les un par les autres. C'est donc un ébranlement plus petit, mais plus vif, qui fait le ton aigu; [Sauveur 1700, 192]

Die Saiten eines tiefen Tons haben also eine grössere Quantität der Bewegung und drücken stärker auf das Gehör, aber die Schläge, die sie darauf übertragen sind weniger dicht, und sozusagen weniger gegenseitig aufeinander abgestützt. Es ist also ein kleineres aber heftigeres Erzittern, das den Ton hoch macht.

Die Stelle behauptet eine Diskrepanz zwischen der Lautstärkenempfindung und der zugehörigen physikalischen Wirkung verschieden hoher Saitentöne. Mit „quantité du mouvement“ ist der Impuls eines bewegten Körpers gemeint:

La quantité du mouvement est le produit de la masse d'un corps par sa vitesse. [Sauveur 1700, 192]

Die Quantität einer Bewegung ist das Produkt der Masse eines Körpers mit seiner Geschwindigkeit.

Man könnte also aus der Stelle einen nicht linearen Amplitudengang des Gehörs herauslesen.

Par les expériences que M. Sauveur a faites pour déterminer le Son fixe, il a remarqué que quand deux tuyaux faisoient un tel accord qu'ils ne battoient que 6 fois, c'est-à-dire que leurs vibrations ne se rencontroient que 6 fois en une Seconde, on distinguoit ces battemens avec assez de facilité. Donc dans tous les accords où les vibrations se rencontreront plus de 6 fois par Seconde, on ne sentira point de battemens, & on les sentira au contraire avec d'autant plus de facilité que les vibrations se rencontreront moins de 6 fois par seconde. [Sauveur 1700, 193]

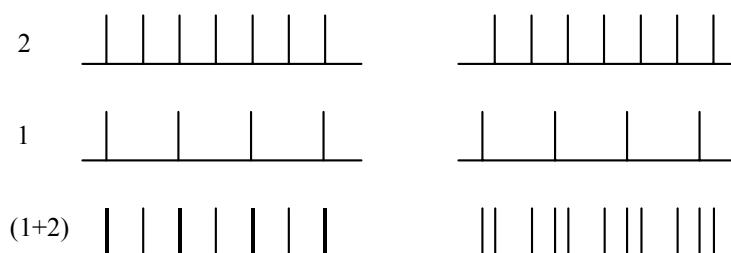
Bei den Experimenten, die Sauveur zur Bestimmung eines fixen Tons gemacht hat, bemerkte er, dass wenn zwei Orgelpfeifen einen solchen Zusammenklang bilden, so dass sie nur sechs Mal schweben, ihre Vibrationen sich also nur sechs Mal pro Sekunde treffen, man diese Schwebungen mit ziemlicher Leichtigkeit unterscheidet. In allen Zusammenklängen also, in welchen sich die Vibrationen mehr als sechs mal treffen, hört man gar keine Schwebungen, aber man hört sie umso deutlicher, wenn sich die Vibrationen weniger als sechs Mal pro Sekunde treffen.

Die Schwebungen werden als Koinzidenz der Impulse verstanden. Da der Hörbereich gegen unten begrenzt ist, nach Sauveur mit $12\frac{1}{2}$ Schwingungen pro Sekunde, schliesst er:

Il est donc impossible que l'on entende jamais | des battemens dans une Octave, quelle qu'elle soit. [Sauveur 1700, 193-194]

Es ist deshalb unmöglich, dass man bei einer beliebigen Oktave je Schwebungen hört.

Bei einer Oktave im Hörbereich gibt es immer mehr als zwölf Koinzidenzen pro Sekunde, folglich kann es dabei nicht zu wahrnehmbaren Schlägen kommen. Es wird dabei offenbar stillschweigend vorausgesetzt, dass die Impulse der beiden Töne immer in Phase sind. Andernfalls gibt es nämlich bei einer Oktave überhaupt keine Koinzidenzen:



Koinzidenzmuster bei der Oktave. Im Beispiel rechts treffen die Impulse aus Grundton und Oktave nie zusammen.

Der von Sauveur behauptete Zusammenhang zwischen den Schwebungserscheinungen und der Koinzidenz der zugehörigen Tonimpulse ist von Robert Smith [Smith 1749, vgl. Kap. [3.2.5](#)] scharf kritisiert worden.

Les battemens ne plaisent pas à l'Oreille, à cause de l'inégalité du Son, & l'on peut croire avec beaucoup d'apparence, que ce qui rend les octaves si agréables, c'est qu'on n'y entend jamais de battemens.

En suivant cette idée, on trouve que les accords dont on ne peut entendre les battemens, sont justement ceux que les Musiciens traitent de Consonances, & que ceux dont les battemens se font sentir, sont les Dissonances; & que quand un accord est Dissonance dans une certaine octave, & Consonance dans une autre, c'est qu'il bat dans l'une, & qu'il ne bat pas dans l'autre. Aussi est-il traité les Consonances imparfaites. Il est fort aisé par les principes de M. Sauveur qu'on a établis ici, de voir quels accords battent, & dans quelles Octaves au-dessus ou au-dessous du Son fixe. Si cette hypothèse est vraie, elle découvrira la véritable source des Règles de la Composition, inconnue | jusqu'à présent à la Philosophie, qui s'en remettoit presque entièrement au jugement de l'Oreille. Ces sortes de jugemens naturels, quelque bizarres qu'ils paraissent quelquefois, ne le sont point; ils ont des causes très réelles, dont la connoissance appartient à la Philosophie, pourvu qu'elle s'en puisse mettre en possession. [Sauveur 1700, 194-195]

Die Schwebungen missfallen dem Gehör, wegen der Ungleichmässigkeit des Tons, und man kann mit gutem Grund annehmen, dass die Oktaven deshalb so angenehm sind, weil man bei ihnen nie Schwebungen hört.

Wenn man diesen Gedanken weiter verfolgt, findet man, dass die Zusammenklänge, bei welchen man keine Schwebungen hört, genau diejenigen sind, die die Musiker als Konsonanzen behandeln, und dass diejenigen, die die Schwebungen spüren lassen, die Dissonanzen sind. Und wenn ein Zusammenklang in einer bestimmten Oktave dissonant ist und konsonant in einer anderen, dann ist dies deshalb, weil er in der einen schwebt, aber nicht in der anderen. Ebenso lassen sich die unvollkommenen Konsonanzen behandeln. Es ist ziemlich einfach, mit Hilfe der oben dargestellten Prinzipien von Sauveur festzustellen, welche Zusammenklänge schweben, und in welchen Oktaven oberhalb oder unterhalb des fixen Tons. Wenn diese Vermutung richtig ist, offenbart sie die wahre Quelle der Kompositionsregeln, die bis anhin in der Philosophie, die sich fast vollständig auf das Urteil des Gehörs abgestützt hat, unbekannt war. Diese Art natürlicher Urteile, wie seltsam sie uns manchmal auch erscheinen mögen, sind es gar nicht; es gibt sehr handfeste Ursachen, deren Kenntnis zur Philosophie gehört, vorausgesetzt, dass sie sich diese aneignet.

Die Formulierung „Urteil des Gehörs“ dürfte eine Reverenz an die Aristoteles/Aristoxenos-Denktradition sein.

Ganz ähnlich wie bei Helmholtz resultiert aus Sauveurs Auffassung eine Abhängigkeit der Konsonanz der Intervalle von der Frequenz des Bezugstons, denn bei beiden spielt der absolute Wert der Schwebungsfrequenz die entscheidende Rolle. Bei Helmholtz führen Partialtonschwebungen mit einer Frequenz von 33 Hz zu einer maximalen Rauigkeitsempfindung. Bei gleicher spektralen Zusammensetzung und gleichem Intervall ist die Frequenz der betreffenden Partialtonschwebungen abhängig von der Frequenz. Die Schwebungsfrequenz von 6 Hz bei Sauveur bezieht sich auf ihre Zählbarkeit, das heisst die Auflösbarkeit, der Schwebungen und nicht auf die Rauigkeitsempfindung, bei der eine solche Auflösung (trägheitsbedingt) nicht möglich ist.

3.2.2. De Mairan (1720)

Diverses observations de physique generale. IV. Histoire de l'Académie Royale des Sciences, 1720, Avec les Memoires de Mathematique & de Physique, pour la même Année. Paris 1722; 11-12 [Mairan 1720] Der Text spricht von de Mairan in der dritten Person, wie in der *Histoire* im Gegensatz zu den *Mémoires* üblich, stammt wohl aber aus seiner Feder.

Im Zusammenhang mit einer möglichen Frequenzabhängigkeit der Schallgeschwindigkeit und im Vergleich von Licht und Schall gibt der Autor der Notiz folgende Charakterisierung von *Bruit*:

Pour le Bruit, qui est l'assemblage & le mélange de tous les tons, comme la Lumière l'est de toutes les couleurs, il doit se transmettre toujours dans le même temps, & absolument sans nulle différence, soit qu'il soit plus ou moins fort. [Mairan 1720, 12]

Das Geräusch, welches die Vermengung und Mischung aller Tönhöhen ist, wie das Licht diejenige aller Farben, muss sich immer in der gleichen Zeit ausbreiten, und absolut ohne jeden Unterschied, auch wenn es mehr oder weniger stark ist.

Die Analogie von Geräusch und Sonnenlicht basiert auf Newtons Korpuskeltheorie des Lichts, wonach die sieben Primärfarben Korpuskeln mit unterschiedlicher Masse beziehungsweise Oberflächenspannung entsprechen. Die obige Charakterisierung des weissen Rauschens ist vor dem Hintergrund einer dazu analogen Schallteilchentheorie zu sehen. Im vorangehenden Passus wird für verschiedene Töne – ohne Begründung – eine unterschiedliche Ausbreitungsgeschwindigkeit behauptet:

Il y aura dans l'air des particules pour chaque ton, comme il y en a dans l'E'ther pour chaque couleur, & il ne sera plus étonnant que l'E'ther transmette en même temps sans confusion différentes couleurs, ni l'Air différents tons. Il est vrai que selon ce que M. de Mairan suppose ici, la transmission de chaque ton doit se faire en des temps différents, mais il est clair aussi que cette différence doit être absolument insensible à l'Oreille. [Mairan 1720, 11-12]

Es dürfte in der Luft Partikel für jede Tonhöhe geben, so wie es solche im Äther für jede Farbe gibt, und es ist nicht weiter erstaunlich, dass der Äther gleichzeitig ohne Durcheinander verschiedene Farben, noch dass die Luft verschiedene Töne, übermittelt. Es ist wahr, dass gemäss dem, was de Mairan hier vermutet, die Übertragung jeder Tonhöhe in verschiedenen Zeiten geschehen muss, aber es ist ebenso klar, dass dieser Unterschied für das Ohr absolut un wahrnehmbar sein muss.

Dies steht im Widerspruch zur gleichen Ausbreitungsgeschwindigkeit von Lärm, da ja ebenso behauptet wird die gleichzeitige Übertragung erfolge ohne gegenseitige Behinderung. Möglicherweise wird hier an ein Zusammenspiel von Ausbreitungsgeschwindigkeit und Eigenschwingung der Schallteilchen gedacht, sodass die Teilchen höherer Frequenz etwas früher beim Empfänger eintreffen. [Vgl. Mairan 1737, 18-19]

Die Rückübertragung von de Mairans Auffassung auf das Licht hätte eine Frequenztheorie für Farben auf Partikelbasis zur Folge. Die naheliegende Folgerung wird, wohl auch aus Rücksicht auf Newtons Autorität, nicht gezogen. Die Schallübertragungstheorie de Mairans ist als Beitrag zu einer einheitlichen Theorie für Licht und Schall auf Basis von Newtons Theorie für Licht zu bewerten [vgl. Hine 1996, 98-101].

Unter dem Gesichtspunkt der Analogie bleibt ferner zu fragen, ob unter „le mélange de tous les tons“, wie beim Licht, auch an eine endliche Zahl verschiedenartiger Tönhöhen teilchen zu denken ist. In diesem Fall müssten entweder weit mehr als sieben Typen pro Oktave zugelassen werden, oder aber dazwischenliegende Tönhöhen wären als Mischungen der Primärtöne (von in der Tönhöhen benachbarten Teilchen) zu deuten. Letzteres führt zu einer Theorie der Wahrnehmung und zu einer ungleichen Behandlung verschiedener Frequenzen. Davon kann hier nicht die Rede sein, denn die Wahrnehmung steht in ungebrochenem Verhältnis zu den auf Auge und Ohr fallenden Licht- und Schallteilchen.

3.2.3. Diderot (1748)

Diderot unterscheidet auf Grund ihrer unterschiedlichen Erzeugung drei Kategorien von Tönen: 1. Töne von Saiten, 2. Töne von angeschlagenen Instrumenten, 3. Töne von

Blasinstrumenten. In Zusammenhang mit der zweiten Kategorie kommt er auf den Unterschied zwischen *son* und *bruit* zu sprechen:

La dilatation et la percussion subite de l'air, qui sont les deux causes des sons de la seconde espèce, agissent à peu près de la même manière.

L'extrême vitesse de l'air, dans la dilatation, ou celle d'un corps mû, dans la percussion, donne lieu à une compression; l'air comprimé tend à se restituer dans son état naturel, mais d'un mouvement accéléré en vertu duquel il exerce des vibrations semblables à celles d'une corde. Or c'est par ces vibrations qu'il faut expliquer le bruit, ou plutôt le son des vents, du tonnerre, de la poudre à canon et de tout corps lancé dans l'air avec vitesse. Mais comme il est impossible d'appliquer à ces phénomènes le calcul, je passe aux sons de la troisième espèce, après avoir observé qu'il y a entre le bruit et le son une grande différence.

Le bruit est un ; le son au contraire est composé ; un son ne frappe jamais seul nos oreilles ; on entend avec lui d'autres sons concomitants ; qu'on appelle ses harmoniques. C'est de là que M. Rameau est parti, dans sa *Génération harmonique*;^[51]

Die Dilatation und das plötzliche Schlagen der Luft, welches die beiden Ursachen der Töne der zweiten Art sind, wirken annähernd auf die gleiche Art.

Die extreme Geschwindigkeit der Luft in der Dilatation oder die eines durch Schlagen bewegten Körpers gibt Anlass zu einer Kompression; die komprimierte Luft tendiert dazu ihren natürlichen Zustand wiederherzustellen, aber mit einer beschleunigten Bewegung aufgrund derer sie Vibrationen ähnlich denen der Saite ausführt. Durch diese Vibrationen ist der *bruit* oder vielmehr der Ton der Winde, des Donners, des Kanonenpulvers und jedes Körpers, der mit Schnelligkeit in die Luft geschleudert wird, zu erklären. Aber weil es unmöglich ist, das Kalkül auf diese Phänomene anzuwenden, gehe ich über zu den Tönen der dritten Art, nachdem ich bemerkt habe, dass zwischen Ton und *bruit* ein grosser Unterschied besteht.

Der *bruit* ist einheitlich. Im Gegensatz dazu ist der Ton zusammengesetzt. Ein Ton schlägt unsere Ohren niemals allein. Man hört mit ihm andere begleitende Töne, die man seine Harmonischen nennt. Davon ist Rameau in seiner *Génération harmonique* ausgegangen.

Das Begriffspaar „compression/dilatation“ verweist auf eine moderne Wellenauffassung, bei der das makroskopische Verhalten der Luft nicht mit den Molekularbewegungen in direkter Korrespondenz zu stehen braucht.

Die im zweiten Absatz des Zitats geäußerte Behauptung, dass die Luft durch plötzliche heftige und einmalige Erregung in Eigenschwingung geraten könne, entspricht heutiger Erkenntnis von der passiven Rolle der Luft bei der Schallübertragung nur unvollkommen. Die im dritten Abschnitt gemachte Aussage führt an den Kern der Sache. Töne sind von Natur aus zusammengesetzt. Sie sind eine Überlagerung von wechselseitig abgestimmten Teiltönen. Die Teiltöne sind eine Konsequenz des Grundtons im Sinne von Rameau und de Mairan, und sie könnten als nicht-lineares Verhalten der Luft (oder des Gehörs) verstanden werden, ganz ähnlich, wie sich die plötzlich angeschlagene Luft gemäss Diderots Auffassung ebenfalls nicht-linear verhält. Ein *bruit* hingegen ist aperiodisch und damit auch nicht mit periodischen Schwingungen analysierbar, auch nicht für die Wahrnehmung.

Diderots Vorstellung von der zusammengesetzten Natur des Tons, scheint seiner eigenen Charakterisierung durch die drei Merkmale Tonhöhe, Lautstärke und Isochronizität zu widersprechen. Die Verwendung des Begriffs *son* im letzten Abschnitt des Zitats ist inkonsistent: der Ton ist eine Menge von Tönen. Diderots Charakterisierung durch die genannten drei Merkmale kann nur auf die konstituierenden Bestandteile, nicht auf das Ergebnis der Zusammensetzung angewandt werden. Dem Französischen scheint für eine saubere Terminologie ein Begriff zu fehlen ...

Diderot führt das Musik-/Kunsterlebnis auf die (intuitive) Erfassung von Verhältnissen/Proportionen zurück. Die Verhältnisse, die einem Geräusch zugrunde liegen, könnten also in Diderots Sichtweise auch zu kompliziert sein, um verstanden zu werden. Unerklärbar bleibt dabei, dass sie als unteilbare Einheit empfunden werden können.

3.2.4. Rousseau (1749)

BRUIT S.m. C'est en général, toute émotion de l'air qui se rend sensible à l'organe auditif. Mais en Musique le mot bruit est opposé au mot Son, & s'entend de toute sensation de l'ouïe qui n'est pas sonore & appréciable. On peut supposer, pour expliquer la différence qui ce trouve à cet égard, entre le bruit & le Son, que ce dernier n'est appréciable que par le concours de ses Harmoniques, & que le bruit ne l'est point parce qu'il en est dépourvu. (...)

Ne pourroit-on pas conjecturer que le bruit n'est point d'une autre nature que le Son, qu'il n'est lui-même que la somme d'une multitude confuse de Sons divers, qui se font entendre à la fois & contrarient, en quelque sorte, mutuellement leurs ondulations? Tous les corps élastiques semblent être plus sonores à mesure que leur matière est plus homogène, que le degré de cohésion est plus égal partout, & que le corps n'est pas, pour ainsi dire, partagé en une multitude de petites masses qui ayant des solidités différentes, résonnent conséquemment à différens Tons.

Pourquoi le bruit ne seroit il pas du Son, puisqu'il en excite? Car tout bruit fait résonner les cordes d'un Clavecin, non quelques-unes, comme fait un Son, mais toutes ensemble, parce qu'il n'y en a pas une qui ne trouve son unisson ou ses Harmoniques. Pourquoi le bruit ne seroit-il pas du Son, puisqu'avec des Sons on fait du bruit? Touchez à la fois toutes les touches d'un Clavier, vous produirez une sensation totale qui ne sera que du bruit, & qui ne prolongera son effet, par la résonnance des cordes, que comme tout autre bruit qui feroit résonner les mêmes cordes. Pourquoi le bruit ne seroit-il pas du Son, puisqu'un Son trop fort n'est plus qu'un véritable bruit; comme une Voix qui crie à pleine tête, & sur-tout comme le Son d'une grosse cloche qu'on entend dans le clocher même? Car il est impossible de l'apprécier, si sortant du clocher, on n'adoucit le Son par l'éloignement.

Mais, me dira-t-on, d'où vient ce changement d'un Son excessif en bruit? C'est que la violence des vibrations rend sensible la résonnance d'un si grand nombre d'aliquotes, que le mélange de tant de Sons divers fait alors son effet ordinaire & n'est plus que du bruit. (...) Tout cela fait ensemble un effet semblable à celui de toutes les touches d'un Clavecin frappées à la fois: & voilà comment le Son devient bruit. [Rousseau, Dictionnaire, Bruit, 60-61]

Das ist im allgemeinen jede Umwälzung der Luft, die sich dem Hörorgan vernehmbar macht. Aber in der Musik ist das Wort *bruit* dem Wort *Son* entgegengesetzt und erstreckt sich über jede Hörempfindung, die nicht klingend und annehmlich ist. Man kann, um den Unterschied, der in dieser Hinsicht zwischen *bruit* und *son* besteht, zu erklären, vermuten, dass letzterer nur durch das Zusammentreffen seiner Harmonischen annehmlich ist und dass es ein *bruit* nicht ist, weil er keine solchen hat. [...]

Könnte man nicht vermuten, dass ein *bruit* von nicht anderer Natur als ein Ton ist, dass er selbst nichts anderes als die Summe einer konfusen Vielheit verschiedener Töne ist, die zusammen gehört werden und die sich in ihren Schwingungen gegenseitig behindern? Alle elastischen Körper scheinen umso klingender, je homogener ihr Material ist, je ausgeglichener der Grad der Kohäsion überall ist und wenn der Körper nicht sozusagen in eine Vielzahl kleiner Massen mit verschiedener Dichte, die auf verschiedene Tonhöhen ansprechen, zerlegt ist.

Warum sollte der *bruit* nicht Ton sein, wenn er solche anregt? Denn jeder *bruit* lässt die Saiten eines Cembalos erklingen, nicht nur einzeln wie bei einem Ton, sondern alle miteinander, denn es gibt keine einzige, die darin nicht ihren Einklang oder ihre Harmonischen findet. Warum sollte der *bruit* nicht Ton sein, wenn man mit Tönen *bruit* machen kann? Schlagen Sie gleichzeitig alle Tasten des Klaviers an, so produzieren Sie eine totale Empfindung, die nichts anderes ist als *bruit* und die ihren Effekt durch die Resonanz der Saiten verlängert, wie jeder andere *bruit*, der die gleichen Saiten zum Erklingen bringt. Warum sollte der *bruit* nicht Ton sein, denn ein zu starker Ton ist nichts anderes als ein wahrhaftiger *bruit*, wie eine Stimme, die aus vollem Kopf schreit oder noch eher wie der Ton einer grossen Glocke, den man im Glockenturm selbst hört? Denn man kann ihn nicht schätzen, wenn man den Ton nicht leiser macht, indem man den Glockenturm verlässt.

Aber von wo, wird man mir sagen, kommt diese Verwandlung eines lauten Tons in einen *bruit*? Es ist so, dass die Heftigkeit der Schwingungen die Resonanz einer so grossen Zahl von Aliquoten wahrnehmbar macht, dass die Mischung so vieler Töne ihre übliche Wirkung zeigt und sie ist nichts anderes als *bruit*. [...] All dies zusammen ergibt einen ähnlichen Effekt, wie wenn alle Tasten eines Cembalos gleichzeitig angeschlagen werden: Und auf diese Weise wird ein Ton zum *bruit*.

Der erste Abschnitt referiert Diderots Ansicht, derzufolge ein Geräusch nicht in Partialtöne zerlegt werden kann [vgl. Kap. 3.2.3]. Die folgenden Abschnitte hingegen deuten Geräusche

als diffuse Gemische von Teiltönen, da sie Saiten mit beliebiger Grundfrequenz gleichzeitig in Resonanz versetzen können. Rousseaus gibt in ihnen seinen eigenen Standpunkt wieder. Das Cembalo übernimmt in der Argumentation die Rolle eines Frequenzanalysators, ähnlich wie bei de Mairan [1737]. Die Überlagerung eines Kontinuums von Frequenzen ist mathematisch als Integral und nicht als Summe zu beschreiben. Die zugehörigen mathematische Analysemethoden werden erst im 20. Jahrhundert in Form der Theorie Integraltransformationen nachgeliefert.

Für Rousseau besteht nur ein gradueller Unterschied zwischen Tönen und Geräuschen. Der französische Ausdruck *bruit* als Gegensatz zu *son* wird im Deutschen meist besser mit Geräusch als mit Lärm wiedergegeben. Im Falle des Tons, der so stark ist, dass er zum Geräusch/Lärm mutiert, wird die Übersetzung schwierig. (Aus diesem Grund wurde in der obigen Übersetzung der Ausdruck *bruit* überall belassen.) Rousseaus Behauptung, dass durch Erhöhung der Lautstärke auch mehr Teiltöne erzeugt werden, entspricht Rameaus Auffassung des Grundtons als Erzeuger. Es ist anscheinend nicht primär die Lautstärke, die aus dem Ton einen Lärm macht, sondern die Vielzahl der intervallmässig immer dichter liegenden Teiltöne. Das diskrete Spektrum eines Tones wird in den entfernteren Oktaven in ihrem Klangeindruck ähnlich zu demjenigen eines kontinuierlichen Spektrums, wenn man von einer intervallbestimmten Empfindlichkeit der Tonhöhenauflösung, der eine logarithmische Darstellung adäquat ist, ausgeht: Bei vier Oktaven liegen die Teiltöne bereits im Halbtonabstand.

Die grosse Zahl von Aliquoten wird erst bei genügender Lautstärke wahrnehmbar. Wie bei Diderot, und Euler hängt die Lautstärke von der Amplitude ab. Die Stelle erlaubt dennoch zwei verschiedene Interpretationen: Die entfernteren Obertöne entstehen erst bei erhöhter Lautstärke, das heisst die Erhöhung der Lautstärke bewirkt automatisch eine Veränderung der Amplitudenverhältnisse im Spektrum, oder aber die Veränderung der Lautstärke hat keinen Einfluss auf die Amplitudenverhältnisse und die schwächeren Teiltöne werden erst bei Überschreitung eines Schwellwertes hörbar. In der zweiten Deutung entspricht die Lautstärkenänderung einer Streckung des Zeitsignals in Ordinateenrichtung, in der ersten variiert die Schwingungsgestalt mit der Lautstärke. Die Schumannschen Klangesetze 1925 behaupten für zahlreiche Musikinstrumente eine Veränderung der Amplitudenverhältnisse bei einer Lautstärkenveränderung.

Geräusche sind, in moderner Sprache, als Schall mit kontinuierlichem Spektrum zu deuten. Natürlich entsteht, wenn nur ein genügend grosser Teil der Tastatur eines Klaviers gleichzeitig gedrückt wird, ebenfalls ein Geräusch (zum Beispiel ein rosarotes Rauschen), und dieses unterscheidet sich von demjenigen, das entsteht, wenn alle Tasten gleichzeitig gedrückt werden (weisses Rauschen). Rousseau äussert im Artikel *BRUIT* klar die Auffassung, dass die spektrale Zusammensetzung über die Klangqualität entscheidet.

Die mathematischen Schwierigkeiten bei der Beschreibung der Töne, die sich in der Auseinandersetzung zwischen Daniel Bernoulli und Leonhard Euler manifestiert, scheinen an Rousseau vorüberzugehen. Aus seinen Überlegungen zu Ton und Geräusch könnte man vermuten, dass er eher zu Bernoullis Auffassung neigt. Klänge und sogar Geräusche können als Überlagerungen von Tönen interpretiert werden. Solange allerdings die Partialtöne nicht auf eine bestimmte Schwingungsform, die Sinusschwingung, festgelegt werden, gibt es nichts zu beweisen. Die Fragestellungen von Daniel Bernoulli und Leonhard Euler sind von diesem Standpunkt aus lediglich mathematische Spitzfindigkeiten ohne Wirklichkeitsbezug.

3.2.5. Smith: Schwebungen temperierter Intervalle (1749)

Smith entwickelt eine Theorie zur Berechnung der Schwebungsfrequenzen von temperierten Intervallen. Obschon er auf Sauveur Bezug nimmt, scheint er das Phänomen der Obertöne nicht zu kennen, und er leitet alle seine Ergebnisse aus überlagerten Impulsmustern zu den Grundfrequenzen ab. Schwebungen werden als Störgeräusche, welche die musikalischen Töne beeinträchtigen, verstanden, und sie zerfallen in die beiden Kategorien „beats“ und „undulations“. Die resultierende Konsonanzauffassung als Minimierung der Störgeräusche ist in Anlehnung an Sauveur von der Tonhöhe und zudem von der Klangfarbe der konstituierenden Töne abhängig. Allerdings findet letztere keinen Eingang in Smiths Berechnungen.

Smith gibt auch ein Verfahren, das die Komplexität von Intervallen aus ihren Verhältniszahlen rechnerisch ermitteln soll. Seine Berechnungsvorschrift ist wesentlich einfacher als Eulers *Gradus suavitatis* in seinem Tentamen. Sie beruht nicht auf der Primfaktorzerlegung der gekürzten Verhältniszahlen, sondern nur auf ihrer Grösse. In seiner Theorie der Schwebungen geht Smith von beliebigen reellen (d.h. rationalen oder irrationalen) Grundfrequenzverhältnissen aus. Sein Ansatz ist also wesentlich allgemeiner als der ihm nicht unbekannte von Euler. Eulers Gedanke des Zurechthörens wird erst später formuliert [vgl. aber Mairan 1737].

Phänomenon.

In tuning musical instruments, especially organs, it is a known thing that while a consonance is imperfect, it is not smooth and uniform as when perfect, but interrupted with very sensible Undulations or Beats; which while the two sounds continue at the same pitch, succeed one another in equal times, and in longer and longer times while either of the sounds approaches gradually to a perfect consonance with the other; till at last the Undulations vanish and leave a smooth, uniform consonance. [Smith 1749, 107]

Quicker undulations are beats, and are remarkably disagreeable in a concert of strong, treble voices, when some of them are out of tune; or in a ring of bells ill tuned, the hearer being near the steeple; or in a full organ badly tuned: Nor can the best tuning wholly prevent that disagreeable battering of the ears with a constant rattling noise of beats, quite different from all musical sounds, and destructive of them, and chiefly caused by the compound stops called the Cornet and Sesquialter, and by all other loud stops of a high pitch, when mixed with the rest. But if we be content with compositions of unisons and octaves to the Diapason, whatever be the quality of their sounds, the best manner of tuning will render the noise of their beats inoffensive if not imperceptible. [Smith 1749, 108-109]

Phänomenon.

Beim Stimmen von Musikinstrumenten, insbesondere von Orgeln, ist es eine bekannte Tatsache, dass wenn ein Zusammenklang unvollkommen ist, er nicht glatt und einheitlich ist, wie einer der vollkommen ist, sondern unterbrochen durch sehr wahrnehmbare Wellenbewegungen oder Schläge, welche, solange die zwei Töne auf der gleichen Tonhöhe fortdauern, in gleichen Zeiten aufeinander folgen, und in immer längeren Zeiten, wenn einer der Töne sich allmählich einem vollkommenen Zusammenklang annähert, bis zuletzt diese Wellenbewegungen verschwinden und einen glatten einheitlichen Zusammenklang übriglassen. Schnellere Wellenbewegungen sind Schläge, und sie sind in einem Zusammenklang starker hoher Stimmen merkbar unangenehm, wenn einige von ihnen daneben singen; oder in einem schlecht gestimmten Glockengeläut, wenn sich der Hörer nahe am Kirchturm befindet; oder in einem schlecht gestimmten vollen Orgelwerk: Aber auch die beste Stimmung kann dieses unangenehme Traktieren der Ohren mit einem konstanten rasselnden Geräusch von Schlägen, die verschieden von allen musikalischen Klängen sind und diese zerstören können, verhindern und die hauptsächlich durch die zusammengesetzten Register, die Cornett und Sesquialter heissen, und durch alle andern lauten Register mit hoher Tonhöhe, wenn man sie mit dem Rest mischt, verursacht werden. Aber wenn wir uns auf Zusammensetzungen aus Einklängen und Oktaven zur Diapason beschränken, so wird die beste Art sie einzustimmen – wie immer auch ihre Klangqualität beschaffen ist –, die Geräusche ihrer Schläge erträglich oder gar unnehmbar machen.

Mit *consonance* ist bei Smith ein allgemeiner Zusammenklang und nicht eine Konsonanz gemeint, und *perfect* und *imperfect consonance* sind nicht vollkommene und unvollkommene Konsonanzen im Sinne der Satzlehre, sondern Zusammenklänge, deren Proportion in einem (einfachen) ganzzahligen Verhältnis stehen oder von einem solchen abweichen. Temperierte Intervalle sind also unvollkommene Zusammenklänge, unabhängig davon, ob es sich dabei um einen Halbton oder eine Quinte handelt. Das erste Zitat besagt also, dass rein gestimmte Intervalle vollkommene Zusammenklänge bilden. Die Vollkommenheit bestimmt sich dabei positiv durch Glätte und Gleichförmigkeit, negativ durch das Fehlen von Schwebungsgeräuschen.

Das zweite Zitat differenziert die Schwebungserscheinungen in *undulations* und *beats*. Letztere haben eine schnellere Wiederholungsrate. Die Beispiele verweisen auf die Abhängigkeit ihrer Stärke von der Klangfarbe. Je nach Register und Mixtur sind sie auch bei perfekter Einstimmung unvermeidbar. Es scheint, als ob sich die von Smith gemeinten Schwebungen im Beispiel der Orgel auf Klänge (*sounds*) beziehen, die einem Tastendruck – repräsentiert durch eine einzige Note – entsprechen. Die störenden Schläge sind bei Mixturen, die nur Töne zur Tonigkeit des Gruntons enthalten (*Diapason*), minim. Bei Registern mit Quintanteilen (*Sesquialter*) sind sie unvermeidbar. Ist diese Deutung richtig und bedeutet „mixed with the rest“ nicht gemischt mit Klängen zu anderen Noten, sondern gemischt mit den andern Registern zur gleichen Note, darf Smith als Vorläufer der Konsonanzauffassung von Helmholtz angesehen werden, denn auch dort hängt die Konsonanz von der Tonhöhe und von der Klangfarbe ab. Was aber im Unterschied zu Helmholtz nicht deutlich wird, ist, ob er die Schwebungen als Partialtonschwebungen begreift. Ursache für diese Unschärfe ist das Fehlen einer präzise Vorstellung darüber, wie die physikalische Entsprechung eines einfachen, in der Wahrnehmung nicht zusammengesetzten Tons beschaffen ist.

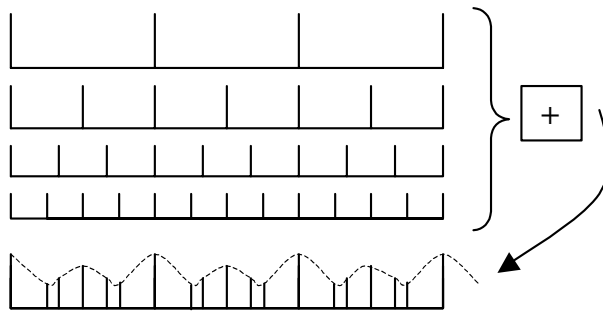
3.2.6. Sulzer (1774)

Wenn wir, wie in den vorhergehenden Anmerkungen geschehen ist, jeden steten, aus nicht zuunterscheidenden Schlägen bestehenden Schall, einen Klang nennen wollen, so giebt es unangenehme, und zur Musik völlig unbrauchbare Klänge, die mehr schnatternde, oder klappernde, als singende Töne bilden. So ist das Rasseln der Räder an einem sehr schnell gehenden Wagen. Es besteht auch aus einzeln Schlägen, die in einander fließen; aber es verdienet den Namen des Klanges nicht; ist auch dem Gehör nicht angenehm. Aber jeder Klang einer reinen Sayte, einer reinen Gloke, er falle auf welche Höhe er wolle, wenn er nur nicht ganz über, oder unter unsern Gehörkreis liegt, ist angenehm: dessen wird kein Mensch in Abrede seyn. Da nun beydes, das Rasseln eines Rads, und das Klingen einer reinen Sayte, aus schnell und allenfalls in gleichen Zeitpunkten wiederholten, in einander fließenden einzeln Schlägen besteht, woher kommt es, daß dieser angenehm ist?

Die Entdeckungen, die man über die Beschaffenheit der klingenden Sayten gemacht hat, haben auch die Auflösung dieser Frag an die Hand gegeben oder doch bestätigt. Denn noch ehe man die Bewegungen einer klingenden Sayte zu berechnen wußte, und schon vor der Mitte des vorigen Jahrhunderts, ist die Beobachtung bekannt worden, daß ein reiner etwas tiefer Ton einer Sayte, einem geübten Gehör, außer dem Unisonus, oder Grundton, auch dessen Octave, dessen Duodecime, auch wol gar die zweyte Octave und deren große Terz hören lasse. Eine wichtige Entdeckung, wozu aber blos ein feines Gehör erfordert wird. Um dieses jedem Leser deutlich zu machen, wollen wir also setzen, man schlage eine wol gespannte und reine Sayte an, die den Ton C angebe; wer nun ein feines Gehör hat, vernimmt diesen Ton C so, daß ihn dünkt er höre zugleich, wiewol in geringer Stärke, die Töne c, g, c e folglich ein Gemenge, oder einen Accord verschiedener und zwar consonirender Töne. Hieraus läßt sich schon begreifen, warum ein solcher Ton voller, mehrklingend und angenehmer ist, als wenn der Ton C ganz allein vernommen würde; jeder Ton ist ein Accord: dadurch hört der Klang auf ein bloßes Klappern zu seyn. [Sulzer 1774, Klang]

Die Vorstellung der einzelnen abgesetzten Schläge entspricht derjenigen von Beeckman und Euler. Der Ton als periodische Impulsfolge ist ein „blosses Klappern“. Die gleichzeitige Darbietung mehrerer solcher Klappergeräusche wird zu einem Klang, wenn die

Klapperfrequenzen (konsonante) Elemente einer arithmetischen Folge sind. Klänge sind also wesentlich zusammengesetzt, und ihre Bausteine sind für sich musikalisch unbrauchbar. Periodische Impulsfunktionen haben in ihrem Fourierspektrum unendlich viele Teiltöne, ihr Geräuschcharakter kann mit den intervallmässig immer enger zusammenrückenden entfernten Obertönen begründet werden. Diese Vorstellung entspricht derjenigen von Rousseau in seinem Argument, wie der Ton zum Geräusch mutieren kann [vgl. Kap. 3.2.4]. Für Sulzer hingegen sind die *ictus* nicht zerlegbar. Durch Überlagerung periodischer Impulsfunktionen verschiedener Grundfrequenz können andere Schwingungsgestalten generiert werden. Das Ergebnis sind digitalisierte periodische Schwingungen.



“Summation” klappernder Impulsobertöne zu einem Klang. Je mehr Teiltöne, desto grösser die (nicht uniforme) Sampling-Rate.

Eine digitalisierte Sinusschwingung ist nur ein Spezialfall davon. Sulzer scheint sich allerdings über die Übertragung eines solchen „Gemenges“ durch die Luft keine Gedanken zu machen. Eulers und Smiths Veranschaulichung der Konsonanzen als simultane Punkt- bzw. Strichmuster, kommt seinen Vorstellungen möglicherweise entgegen. Immerhin enthält Sulzers Artikel *Klang* einen Verweis auf Eulers *Tentamen novae theoriae musicae* [1739] in Zusammenhang mit der Frage des Konsonanzcharakters der Naturseptom. Sulzer hat keine naive Vorstellung von der Überlagerung mehrerer Bewegungen in der Schwingung einer Saite, was seine – später von Koch [1802] übernommene – neuartige Veranschaulichung der Superposition als Summe zeigt:



Es handelt sich dabei um Momentaufnahmen des Grundtons mit seiner Oktave und des Grundtons mit seiner Duodezim. Die Kurven von A via c und d nach B und von A via e und f nach B beschreiben mögliche Zustände der Saite, je nach Vorzeichen der Oktave bei simultaner Maximalauslenkung ($\sin(nx) + \lambda \sin(2nx)$ und $\sin(nx) - \lambda \sin(2nx)$). Zwei analoge Situationen sind unterhalb AB für die Duodezim gezeichnet ($\sin(nx) + \mu \sin(3nx)$ und $\sin(nx) - \mu \sin(3nx)$). Im Unterschied zu Mersenne [Kap. 2.4.4] und zu Koenig [Kap. 6.4] sind für ihn die gleichzeitigen Töne auch gleichzeitig sichtbar.

Es ist dies die erste mir bekannte Veranschaulichung der Superposition harmonischer Schwingungen in der gleichen Schwingungsebene. Sulzer ist seinen eigenen Angaben zufolge beim Beobachten der schwingenden Saite auf Grund der Trägheitsbedingten, optischen Verwischung der überstrichenen Bereiche zu dieser Form der Darstellung gelangt. Ähnlich wie bei Breeckman scheinen aus den stetigen Bewegung der Saite diskontinuierliche abgesetzte Luftschläge zu resultieren. Das Verhalten der Luft ist bei der Schallaufnahme demnach ebenfalls nicht linear wie bei Rameau/de Mairan.

3.2.7. Erleben (1777)

In Zusammenhang mit der Charakterisierung des Schalls einer Saite spricht Erleben von einer „grösseren Annehmlichkeit“ im Unterschied zu den „gemeinen unangenehmen Geräuschen“ [§280; 221], und er definiert den Begriff Klang über die korrespondierende Empfindung:

Man könnte einen solchen angenehmen Schall einen *Klang* nennen. Es scheint als ob die klingenden und die bloß schlechtweg schallenden Körper darinn von einander unterschieden wären, daß diese den benachbarten Lufttheilchen lauter Schwingungen eindrücken, die an sich in Absicht auf ihre Geschwindigkeiten höchst verschieden sind; da jene hingegen in allen Lufttheilchen entweder nur einerley Schwingungen, oder solche hervorbringen, die in Betracht der Zeiten in denen sie gemacht werden, nur auf eine gewisse nicht so mannichfaltige Weise verschieden sind. [Erleben 1777, §280; 221]

Bemerkenswert die Unterscheidung von *schallenden* und *klingenden* Körpern, der französische *corps sonore* lässt keine solche Differenzierung zu.

Die obige Gegenüberstellung nennt als physikalisches Bestimmungsmerkmal der Geräusche ihre uneinheitliche Bewegung. Je nach Auslegung des Begriffs Schwingung sind zwei Lesarten möglich: Die Schwingung als eine einzelne Halb- oder Ganzschwingung verstanden, deutet auf ein nicht isochrones Schallsignal im Sinne von Diderot [vgl. Kap. 3.1.10].

Interpretiert man hingegen Schwingung als periodischen Vorgang ergibt sich die Gleichzeitigkeit mehrerer Töne als Charakteristikum eines Geräusches. Die zweite Deutung wird durch eine Stelle aus einem sich auf Euler stützenden Vergleich von Ton und Farbe gestützt:

So wären also die Farben für das Auge das, was die Töne für das Ohr sind; die violette Farbe wäre gleichsam der tiefere Ton, die rothen die höhern (oder vielleicht umgekehrt); das Weisse wäre für das Auge, was ein unordentliches Geräusche und ein Gemisch von allen Tönen für das Ohr ist. [Erleben 1777, §368; 280-281]

Euler erklärt die Spektralfarben als verschiedene Frequenzen, Newton dagegen durch siebenlei Typen verschieden schwerer Lichtpartikel. Weisses Licht wird von beiden als Überlagerung der verschiedenen Spektralfarben gedeutet. Erleben gibt also eine Beschreibung des weissen Rauschens als kontinuierliches Spektrum. Die andere Deutung der Geräusche als anisochrome Schwingungen ist damit nicht unverträglich, denn durch Summation (Integration) über „alle Töne“ ergibt sich ein unregelmässiger aperiodischer Schalldruckverlauf. Die Überlegungen Erlebens zu den Geräuschen scheinen, wie schon diejenigen von Rousseau (Niederdrücken aller Tasten), von der Vorstellung von kontinuierlichen Klangspektren geleitet. Die diesbezügliche mathematische Theorie der Integraltransformationen, welche es erlaubt, allgemeine Zeitfunktionen in Spektren und umgekehrt zu verwandeln, wurde wie bereits erwähnt erst im 20. Jahrhundert entwickelt. Insgesamt scheinen die Autoren bei der Gegenüberstellung von Ton und Geräusch viel eher zu spektralen und über die diskreten Spektren hinausweisende Auffassungen zu neigen als bei

der isolierten Betrachtung der Töne und Klänge. Matthesons Ansatz der Negativdefinition erweist sich in diesem Zusammenhang als hilfreich.

3.3. *Timbre*

La voix s'étend, s'affermit et prend du timbre; les bras se développent, la démarche s'assure, et l'on s'aperçoit que, de quelque manière qu'on soit mise, il y a un art de se faire regarder. [Rousseau, Emile 1762, 467-468]

Die Encyclopédie (Band 16, 1765) enthält sowohl einen Artikel *TIMBRE* (333–334) als auch einen Artikel *TYMBRE* (775). Die Definition im letzteren, in der Bedeutung als Klangqualität, stimmt mit derjenigen in Rousseaus *Dictionnaire de Musique* weitgehend überein. Die Definition im *Dictionnaire de musique* ist aber an drei Stellen umfassender. Rousseaus Beiträge zur *Encyclopédie* stammen aus dem Jahr 1749. Der Begriff *tymbre/timbre* kommt in der uns interessierenden Bedeutung auch in den Artikeln *VOIX*, *SON*, *EXPRESSION* (*Dictionnaire*, 1767, 211) vor. Ein älterer Nachweis konnte nicht gefunden werden. Der Begriff kommt bei Brossard, *Dictionnaire de musique* [1707] nicht vor. Gemäss *Petit Robert* und *Robert* soll er (ohne Nachweis) schon seit dem 17. Jahrhundert in dieser Bedeutung verwendet werden.

Der Artikel *TIMBRE* in der *Encyclopédie* erklärt den Begriff in seinen unterschiedlichsten Bedeutungen. Darunter findet sich auch eine Besprechung der engeren musikalischen Bedeutungen, die nicht von Rousseau stammt, und die nach Rousseaus Beiträgen verfasst wurde. Die Thematik *tymbre* wird im Artikel *SON* ausführlicher behandelt als in diesen Spezialartikeln.

Möglicherweise ist die Idee zu einem Artikel *tymbre* erst entstanden, nachdem der Artikel *son* bereits geschrieben oder noch in Arbeit war.

Bemerkenswert ist, wie bereits erwähnt, der Verlust des Artikels *timbre* in den Ausgaben um 1780, der sich vermutlich durch die Vereinheitlichung der Schreibweise und der damit verbundenen Umstellung in der Reihenfolge ergeben hat.

3.3.1. Rousseaus Definitionen

Der Begriff *Tymbre* erscheint als letzter Eintrag zum Buchstaben *T*, in der von Alain Cernuschi [2000] präsentierten „rätselhaften“ Wörterliste aus Rousseaus Hand. Sie diene Rousseau vermutlich als Referenzpapier beim Verfassen der Artikel für die *Encyclopédie* [Cernuschi 2000, 28] und wäre demnach 1749 entstanden.

Wir geben im folgenden den vollen Wortlaut von Rousseaus Artikeln *TYMBRE* der *Encyclopédie* und des *Dictionnaire de Musique* wieder:

TYMBRE, s.m. en Musique, on appelle ainsi cette qualité du son par laquelle il est aigre ou doux, sourd ou éclatant.

Les sons doux ont ordinairement peu d'éclat, comme ceux de la flûte; les sons éclatants sont sujets à l'aigreur, comme les sons de la vielle ou du hautbois. Il y a même des instrumens, tels que le clavecin, qui sont à-la-fois sourds & aigres; & c'est le plus mauvais tymbre. Le beau tymbre est celui qui réunit la douceur à l'éclat de son; on en peut donner le violon pour exemple. Voyez SON. (S) [Encyclopédie, 1765]

TYMBRE. On appelle ainsi, par métaphore, cette qualité du son par laquelle il est aigre ou doux, sourd ou éclatant, sec ou moëlleux. Les sons doux ont ordinairement peu d'éclat, comme ceux de la flûte & du luth; les sons éclatants sont sujets à l'aigreur, comme ceux de la vielle ou du hautbois: il y a même des instrumens, tels que le clavecin, qui sont à la fois sourds & aigres; & c'est le plus mauvais tymbre: le beau tymbre est celui qui réunit la douceur à l'éclat; tel est le tymbre du violon. [Rousseau, Dictionnaire, 1767]

TYMBRE. Man nennt so, **bildhaft gesprochen**, diese Eigenschaft des Tons, durch welche er sauer (bitter) oder süß, dumpf oder hell (glänzend, schmetternd), **trocken oder weich** ist. Die süßen Töne haben in der Regel wenig Helligkeit (Glanz), wie diejenigen der Flöte **und Laute**. Die hellen Töne sind der Sauerkeit (Bitterkeit) unterworfen, wie diejenigen der (Dreh-)Leier oder der Oboe: Es gibt sogar Instrumente wie das Cembalo, die gleichzeitig dumpf und sauer (bitter) sind; und dies ist das schlechteste *tymbre*, das schöne *tymbre* ist dasjenige, welches die Süßigkeit mit der Helligkeit verbindet; so ist das *tymbre* der Violine.

Auffällig ist die Wendung „par métaphore“ im *Dictionnaire*. Auf welche Bedeutung der zur Zeit üblichen Anwendungen des Begriffs bezieht sich die Metapher *tymbre*? Auf welche Bedeutung bezieht sich die Abstraktion? *Tymbre* als Schnarrseite der Pauke, *tymbre* als Eigenschaft der Singstimme, *tymbre* als Klingel, *tymbre* als unverwechselbarer Stempel eines Tons? Aufschluss darüber gibt vielleicht die Definition der musikalischen Bedeutung von *TIMBRE* in der *Encyclopédie*:

TIMBRE, *s.m. terme de Bossetier*; ce sont deux cordes de boyau, posées sur la dernière peau d'un tambour, & et qui lorsqu'on bat la peau de dessus, servent à faire resonner la caisse.
On dit en un sens assez voisin, le timbre d'une cloche, pour sa résonnance; le timbre de la voix; le timbre d'un instrument musical, d'airain ou de métal. (D. J.) [Encyclopédie, 1765]

Timbre, Ausdruck ?????; das sind zwei Darmsaiten, die auf der letzten Haut einer Trommel befestigt sind, und die, sobald man die Haut von oben anschlägt, die Trommel zum klingen bringen.
Man gebraucht in einem ziemlich verwandten Sinn das *timbre* einer Glocke für ihre Resonanz, das *timbre* der Stimme, das *timbre* eines musikalischen Instruments aus Erz oder Metall.

D. J. ist die Signatur von Louis Chevalier de Jaucourt (1704-1780) [vgl. Kafker 1988, 175-180] Die Artikel wurden vermutlich kurz vor der Publikation verfasst. Jaucourt verfasste in dieser Zeit sehr viele Beiträge für die *Encyclopédie*.

Die Pauke als Schallerzeuger kann mit dem menschlichen Stimmapparat verglichen werden. Der *Timbre*, die Schnarrsaite, hat für die Pauke als *Tongeber* (Lichtenhahn) eine ähnliche Funktion wie die unterschiedliche Einstellung des Stimmapparats bei der Umfärbung eines Vokals konstanter Tonhöhe in einen anderen. Die Umfärbung einer Pauke durch die Schnarrsaite (Spannungsänderung) bewirkt gleichzeitig eine Frequenzverschiebung und nicht nur den Übergang zu einer andern *Klangfarbe*.

Eine Stimme ohne *Timbre* im Sinne von Rousseaus Emile wäre also eine, die noch über keinen geschulten Regelmechanismus der Timbrierung verfügt.

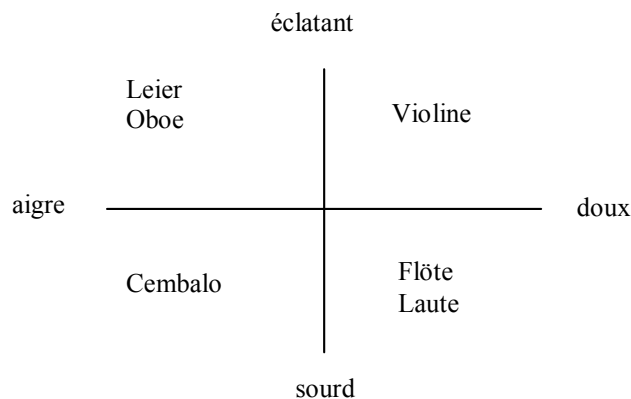
Die uns immer wieder begegnende Wendung „battre l'air“ im Zusammenhang mit der Erklärung des Schalls erhält durch die Wortwahl neue Nahrung: Schall ist eine schlagende Luftbewegung, die vom Ohr/Gehirn registriert werden kann. *Timbre*, *timbro* (it.) lassen in ihrem Wortklang und nicht nur in ihrer Etymologie Assoziationen an Trommelgeräusche aufkommen. Falls Rousseau der Bedeutungsschöpfer von *tymbre* im Sinne einer Klangqualität ist, war er sich des Gebrauchs der Katachrese, mangels eines französischen Fachbegriffs jedenfalls bewusst. Das Fehlen von „par métaphore“ in der *Encyclopédie*, könnte ein Eingriff der Herausgeber sein und ist möglicherweise Indiz für den durchschlagenden Erfolg der Metapher..

Rousseaus Definition von *TIMBRE* als Klangqualität, die durch drei Gegensatzpaare von Adjektiven gegeben wird, lässt es aus moderner wahrnehmungspsychologischer beziehungsweise "Schönbergischer" Sicht naheliegend erscheinen, die Klangfarben als Punkte in einem mehrdimensionalen Merkmalsraum zu deuten.

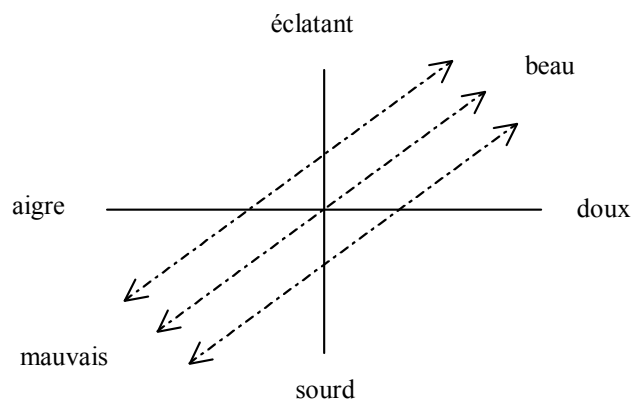
Die von Rousseau gebrauchten Adjektivpaare stammen alle aus unterschiedlichen Sinnesmodalitäten:

aigre – doux: Geschmacksinn
 sourd – éclatant: Gehörsinn/Sehsinn
 sec – moelleux: Tastsinn

Die Verwendung von Begriffspaaren zur Charakterisierung des *timbre* führt auf einen mindestens zweidimensionalen *timbre space* der Musikinstrumentenklänge. Ob tatsächlich alle drei Dimensionen zur Erfassung erforderlich sind, ist, da zu wenig Instrumente charakterisiert werden, und auch keine Adjektivtripel gebraucht werden, nicht eindeutig auszumachen. Es scheint in diesem Zusammenhang bedeutsam, dass in der *Encyclopédie*-Definition das dritte Adjektivpaar (*sec-moelleux*) noch fehlt. Widerspiegelt dies Rousseaus Einsicht bei der Überarbeitung des Artikels, dass zwei Adjektivpaare zur Charakterisierung des *Timbres* nicht ausreichen? Wenn ja, hat er sich leider nicht die Mühe gemacht, diesbezügliche Beispiele zu geben. Aus Rousseaus Charakterisierungen ergibt sich die folgende zweidimensionale Anordnung:



Rousseau gibt zu allen vier möglichen Kombinationen Beispiele, was beweist, dass die beiden Achsen *aigre-doux* und *sourd-éclatant* als von einander unabhängig zu denken sind. Die Bewertung eines *Timbres* innerhalb dieser Ebene als *schön/schlecht* erfolgt von unten links nach oben rechts:



Die im gleichen Quadranten liegenden Paare Leier/Oboe und Flöte/Laute werden nicht gegenseitig bewertet.

Mersennes Auflistung war im Gegensatz dazu explizit gegen oben offen [vgl. Kap. [2.7.2](#)].

Eine dreidimensionale Anordnung wurde von Grey 1975 angegeben und wird heute am IRCAM als Standard angesehen [McAdams im Gespräch, Jan. 2001]. Wolfgang Thies kommt hingegen in seiner Dissertation *Grundlagen einer Typologie der Klänge* [Thies 1982] nicht zu einer so starken Reduktion der Dimension [vgl. Kap. 7].

3.3.2. Timbre im Artikel SON

Wie bereits erwähnt wird das Thema im Artikel *SON* ausführlicher behandelt als im Artikel *TYMBRE* selbst:

Quant à la différence qui se trouve encore entre les Sons par la qualité du timbre, il est évident qu'elle ne tient ni au degré de gravité, ni même à celui de force. Un hautbois aura beau se mettre exactement à l'unisson d'une flûte, il aura beau radoucir le Son au même degré, le Son de la flûte aura toujours je ne sais quoi de moëlleux & de doux, celui du hautbois je ne sais quoi de rude & d'aigre, qui empêchera qu'on ne puisse jamais les confondre. Que dirons-nous des differens timbres des voix de même force & de même portée ? chacun est juge de la variété prodigieuse qui s'y trouve. Cependant personne que je sache, n'a examiné cette partie; qui peut-être, aussi bien que les autres, se trouvera avoir ces difficultés : car la qualité de timbre ne peut dépendre ni du nombre de vibrations, qui font le degré du grave à l'aigu, ni de la grandeur ou de la force de ces mêmes vibrations, qui fait le degré du fort au foible. Il faudra donc trouver dans le corps sonore une troisième modification différente de ces deux, pour expliquer cette troisième propriété; ce qui me paroît pas une chose trop aisée ; il faut recourir aux principes d'acoustique de M. Diderot, si l'on veut approfondir cette matiere. [Encyclopédie, *Son*, 346]

Quant à la différence qui se trouve encore entre les Sons par la qualité du Tymbre, il est évident qu'elle ne tient ni au degré d'élévation, ni même à celui de la force. Un Hautbois aura beau se mettre à l'Unisson d'une Flûte, il aura beau radoucir le Son au même degré, le Son de la Flûte aura toujours je ne sais quoi de moëlleux & de doux, celui du Hautbois je ne sais quoi de rude & d'aigre, qui empêchera que l'oreille ne les confonde; sans parler de la diversité du timbre des voix. (Voyez VOIX) Il n'y a pas un Instrument qui n'ait le sien particulier, qui n'est point celui de l'autre, & l'Orgue seul a une vingtaine de jeux tous de Tymbre différent. Cependant personne que je sache, n'a examiné le Son dans cette partie; laquelle, aussi bien que les autres, se trouvera peut-être avoir ces difficultés; car la qualité du Tymbre ne peut dépendre ni du nombre de vibrations, qui fait le degré du grave à l'aigu, ni de la grandeur ou de la force de ces mêmes vibrations, qui fait le degré du fort au foible. Il faudra donc trouver dans le corps sonore une troisième cause différente de ces deux, pour expliquer cette troisième qualité du Son & ses différences; ce qui peut-être n'est pas trop aisé. [Dictionnaire, *Son*, 444-445]

Was diejenige Unterscheidung betrifft, die sich bei den Tönen aus der Qualität des *Timbres* ergibt, ist es offensichtlich, dass sie weder vom Grad der Erhebung (Höhe) noch von demjenigen der Stärke herrührt. Eine Oboe kann sich schön mit einer Flöte in Einklang bringen, sie kann gut den Ton auf die gleiche Lautstärke reduzieren, der Ton der Flöte wird trotzdem dieses ich weiß nicht wie Weiche und Süße haben, derjenige der Oboe, das ich weiß nicht wie Raue und Bittere, was das Ohr daran hindert, sie zu verwechseln; ohne von der Verschiedenheit des *Timbres* der Stimmen zu reden (vgl. VOIX). Es gibt kein Instrument, das nicht sein charakteristisches *Timbre* hat, das nicht von (jedem) anderen verschieden ist, und die Orgel allein hat gut zwanzig Register, jedes mit einem anderen *Timbre*. Trotzdem hat meines Wissens niemand den Ton in dieser Hinsicht untersucht, worin sich ebenso wie bei den andern beiden andern gewisse Schwierigkeiten einstellen dürften; denn die Qualität des *Timbres* kann nicht von der Zahl der Schwingungen abhängen, die den Grad von der Tiefe zur Höhe ausmacht, noch von der Größe oder Stärke der gleichen Schwingungen, die den Grad des Starken zum Schwachen ausmacht. Man muss deshalb im klingenden Körper eine dritte von diesen beiden verschiedene Ursache finden, um diese dritte Qualität des Tons und seiner Unterschiede zu erklären, was möglicherweise nicht allzu einfach ist. [Dictionnaire]

Mit Ausnahme von *Son*, dem Definiendum, benutzt die *Encyclopédie* konsequente Kleinschreibung der Substantive.

Im Dictionnaire wird überall *Tymbre* anstelle von *timbre* verwendet. Seltsamerweise ist der Hauptartikel in der *Encyclopédie* aber *TYMBRE* und nicht *TIMBRE*.

Im Dictionnaire findet sich kein Querverweis auf den Artikel *VOIX*, dafür wird auf die Verschiedenartigkeit des *Timbres* der Singstimmen nachdrücklich hingewiesen.

de même force & de même portée: Interessanterweise steht nicht der gleichen Tonhöhe. Folgt daraus, dass Töne mit verschiedenen Tonhöhen das gleiche *Timbre* haben können? Wie ist aber *portée* zu deuten? Ist Reichweite als sinnverwandtes Wort zur Lautstärke gemeint? Diese Eigenschaft ist wahrnehmungszentriert, da von der Entfernung zur Schallquelle abhängig. Sie kann demnach als psychoakustische Größe gelten. [Die Entfernung, aus der ein Schallsignal noch wahrgenommen bzw. „richtig“ interpretiert werden kann, ist von der Frequenzzusammensetzung abhängig. Der nichtlineare Frequenzgang des Gehörs und die frequenzabhängige Wahrnehmungsgrenze verursachen eine Klangfarbenänderung bei Veränderung der Entfernung zur Schallquelle.] Die Verwendung von *portée d'une voix* im Sinne von Reichweite ist ab dem 17. Jahrhundert nachweisbar (Petit Robert, 1990, *PORTEÉ*, 1487). Allerdings findet sich bei Rousseau auch die Verwendung im Sinne von tonhöhenmässig lokalisiertem Ambitus, das heisst synonym zu *étendue*. So im Artikel *VOIX Encyclopédie* Bd. 17, 1765, 436-437, *Dictionnaire*, 544. Diese zweite Deutung scheint hier plausibler, wenn man in Rechnung zieht, dass dies für Rousseau das primäre Charakteristikum der Stimmen darstellt:

Le caractère le plus général qui distingue les *Voix*, n'est pas celui qui se tire de leur *Tymbre* ou de leur *Volume*; mais du Degré qu'occupe ce *Volume* dans le Système général des Sons. [*Dictionnaire*, *VOIX*, 543]

Der allgemeinste Charakter, der die Stimmen unterscheidet, ist nicht derjenige, der sich aus ihrem *Timbre* oder ihrem Ambitus ableitet, sondern vom Tonhöhenbereich, den, dieser Ambitus im allgemeinen System der Töne belegt.

Volume ist nicht etwa mit Volumen oder Fülle zu übersetzen, sondern mit *Ambitus*. Man vergleiche hierzu den Artikel *VOLUME* im Dictionnaire (547), der die obige Übersetzung legitimiert.

Zurück zum Artikel *SON*:

Timbre ist neben Tonhöhe und Lautstärke eine dritte Qualität von Tönen. Die Dauer wird als selbständiger Parameter nicht in Betracht gezogen.

troisième propriété wird im Dictionnaire zu *troisième qualité* und *troisième modification* zu *troisième cause*. Jedenfalls wird die Ursache im klingenden Körper gesucht, nicht in der Schwingung selbst. Im Unterschied dazu sind Tonhöhe und Lautstärke Eigenschaften der Schwingung bzw. der Wahrnehmung. Rousseau formuliert hier nicht so trennscharf ein dreigeteiltes Kommunikationsmodell wie Diderot.

Der Hinweis auf Diderot findet sich nur in der *Encyclopédie*. Die *Principes d'acoustique* [1748] sind bezüglich *timbre* unergiebig [vgl. Kap. 3.1.10]. Das Weglassen des Verweises könnte im inzwischen abgekühlten Verhältnis zu Diderot begründet sein. Möglicherweise ist der Verweis auf Diderot in der *Encyclopédie* aber auch ein früher redaktioneller Eingriff von Diderot selbst (freundlicher Hinweis von Ernst Lichtenhahn). Dafür spricht auch, dass sich *tymbre* bei Rousseau nicht auf *isochronisme* bei Diderot reduzieren lässt [vgl. Kap. 3.1.10]. Für sich gelesen konstatiert die abschliessende Bemerkung im *Dictionnaire* das Fehlen einer befriedigenden physikalischen Erklärung für die Verschiedenartigkeit des *Timbres*. Obschon Rousseau im selben Artikel *SON* (442) im Zusammenhang mit der Obertonreihe auf Tartini verweist, ist ihm die von Tartini gegebene spektrale Deutung [Kap. 3.1.8] offenbar unbekannt. Ebenso wenig zieht er die korrespondierenden Überlegungen Rameaus in Betracht [Kap. 3.1.3].

Zwei Jahre vor Erscheinen des *Dictionnaires* findet sich in einem Artikel von Euler eine Passage, die sich direkt auf diese Stelle zu beziehen scheint [vgl. Kap. 3.3.4].

Der Querverweis auf den Artikel *VOIX* findet sich nur im *Dictionnaire*, obschon einer der Beiträge zu *VOIX* der *Encyclopédie* ebenfalls von Rousseau stammt. Dieser ist für den *Dictionnaire* erweitert worden und enthält neu die oben zitierte Passage, deren Kontext den Querverweis rechtfertigt.

Die Musikinstrumente sind durch ihr individuelles *Tymbre* charakterisiert. Die Orgel ist ein Spezialfall, bei dem die verschiedenen Register die Rolle von verschiedenen Instrumenten spielen. Es ist nicht unerheblich für ihren Charakter, mit welchem Instrument eine gegebene Melodie gespielt wird. Der *Dictionnaire* geht in seiner Einschätzung der Wichtigkeit der Instrumentierung über die *Encyclopédie* hinaus.

Die sich folgende Passage ist im *Dictionnaire* um das Begriffspaar *sourds/éclatans* ergänzt:

Les trois qualité principales dont je viens de parler entrent toutes , quoiqu'en différentes proportions , dans l'objet de la musique , qui est en général le *Son* modifié.

En effet , le compositeur ne considère pas seulement si les *Sons* qu'il emploie doivent être haut ou bas , graves ou aigus ; mais s'ils doivent être forts ou faibles , aigres ou doux , & il les distribue à différents instrumens , en récit ou en chœurs, aux extrémités ou dans le medium des voix, avec des doux ou des forts, selon les convenances de tout cela. [Encyclopédie, 346]

Les trois qualité principales dont je viens de parler entrent toutes , quoiqu'en différentes proportions , dans l'objet de la Musique , qui est le Son en général.

En effet , le Compositeur ne considère pas seulement si les Sons qu'il emploie doivent être haut ou bas , graves ou aigus ; mais s'ils doivent être forts ou faibles , aigres ou doux , sourds ou éclatans; & il les distribue à différents Instrumens , à diverses voix en Récits ou en Chœurs, aux extrémités ou dans le *Medium* des Instrumens ou des voix, avec des *Doux* ou des *Forts*, selon les convenances de tout cela. [Dictionnaire, 445]

Die drei hauptsächlichsten Qualitäten, von denen ich gesprochen habe, betreffen, wenn auch in verschiedenem Ausmaß, den Gegenstand der Musik, welcher der Ton im allgemeinen ist.

Tatsächlich hat der Komponist nicht bloß zu beachten, ob die Töne, die er verwendet, hoch oder tief sind, schwer oder spitz, sondern auch ob sie stark oder schwach, bitter oder süß, **dumpf oder hell** sind, und er verteilt sie auf verschiedene Instrumente, **auf verschiedene Stimmen**, solistisch oder in Chören, in den Extremen oder in der Mitte des Ambitus der **Instrumente oder** Stimmen, forte oder piano, entsprechend den Anforderungen an dies alles. [Dictionnaire]

Die Wichtigkeit der Klangfarben und der Instrumentierung für das Kompositionshandwerk und für die Identität einer Komposition als Kunstwerk wird damit zur Sprache gebracht. Es sollen noch fast hundert Jahre vergehen, bis Berlioz eine Instrumentationslehre vorlegt, die dieser Einschätzung Rechnung trägt [vgl. Kap. [4.4.6](#)].

3.3.3. Tymbre und Vibrato im Artikel *VOIX* des *Dictionnaire*

Eine Stimme ist wie ein Fingerabdruck:

Chaque Individu a sa *Voix* particulière qui se distingue de toute autre *Voix* par quelque différence propre, comme un visage se distingue d'un autre; mais il y a aussi de ces différences qui sont communes à plusieurs, & qui, formant autant d'Espèces de Voix, demandent pour chacune une dénomination particulière.

Le caractère le plus général qui distingue les *Voix*, n'est pas celui qui se tire de leur Tymbre ou de leur Volume; mais du Degré qu'occupe ce Volume

Jedes Individuum hat seine partikuläre Stimme, die sie von jeder andern Stimme durch eine gewisse eigentümliche Differenz auszeichnet, wie ein Gesicht sich von einem anderen unterscheidet, aber es gibt auch solche Unterschiede, die mehreren gemeinsam sind, und die, indem sie mehrere Arten von Stimmen bilden, für jede eine eigene Bezeichnung erfordern.

Der allgemeinste Charakter, der die Stimmen unterscheidet, ist nicht derjenige, der sich aus ihrer

dans le Systême général des Sons. [Dictionnaire 1767, 543]

Klangfarbe oder ihrem Ambitus ableitet, sondern vom Tonhöhenbereich, den dieser Ambitus im allgemeinen System der Töne belegt.

Das Hauptkriterium bei der Einteilung der Stimmen ist ihr Ambitus und seine Lokalisierung im Tonhöhenbereich. Erst in zweiter Stufe kommen die Unterschiede des *tymbre* zum Tragen. Deshalb vergleicht Rousseau im folgenden Zitat nur hohe mit hohen Stimmen. Ob das *tymbre* einer hohen und dasjenige einer tiefen Stimme grundsätzlich unvergleichbar sind, kommt nicht zum Ausdruck. Können Töne verschiedener Tonhöhe das gleiche *tymbre* haben?

Mais de toutes les *voix* aiguës, il faut convenir , malgré la prévention des Italiens pour les Castrati , qu'il n'y en a point d'espèce comparable à celle des femmes, ni pour l'étendue ni pour la beauté du Tymbre.
La *voix* des enfans a peu de consistance & n'a point de bas; celles des Eunuques, au contraire, n'a d'éclat que dans le haut; & pour le Faucet c'est le plus désagréable de tous les Tymbres de la *voix* humaine : [...] [Dictionnaire 1767, 543]

Aber unter allen hohen Stimmen, muss man gestehen, trotz der Vorliebe der Italiener für die Kastraten, dass es unter ihnen kaum eine Art gibt, die vergleichbar ist mit derjenigen der Frauen, weder bezüglich Umfang noch Schönheit des Timbres.

Die Stimme der Kinder hat wenig Konsistenz und kaum Tiefe, diejenige der Eunuchen hat Helligkeit nur in der Höhe, und für den Falsett gilt, das ist das unangenehmste aller Timbres der menschlichen Stimme.

Ein *tymbre* kann also angenehm und schön sein, diesbezüglich sind hohe und tiefe Stimmen vergleichbar. Aber angenehm und schön gehören gemäss Rousseaus Definition nicht zu den definierenden, sondern zu den abgeleiteten Eigenschaften von *tymbre*.

Weiterhin verwendet Rousseau, ebenfalls im Artikel *VOIX*, den Begriff *tymbre* in Zusammenhang mit der Deutung des Vibratos. Er bezieht sich dabei auf Ausführungen von Duclos in der *Encyclopédie*, die sich ihrerseits auf Dodard beziehen.

Car, premièrement, on peut, à volonté, donner ou ôter à la *Voix* cette ondulation quand on chante, & l'on n'en chante pas moins quand on file un Son tout uni sans | aucune espèce d'ondulation.
Secondement, les Sons des Instrumens ne diffèrent en aucune sorte de ceux de la *Voix* chantante, quant à la nature des Sons musicaux, & n'ont rien par eux-même de cette ondulation. Troisièmement, cette ondulation se forme dans le Ton & non dans le Tymbre; la preuve en est que, sur le Violon & sur d'autres Instrumens, on imite cette ondulation, non par aucun balancement semblable au mouvement supposé du larynx, mais par un balancement du doigt sur la Corde, laquelle, ainsi raccourcie, & rallongée alternativement & presque imperceptiblement, rend deux Sons alternatifs à mesure que le doigt se recoule ou s'avance. Ainsi l'ondulation, quoi qu'en dise M. Dodard, ne consiste pas dans un balancement très-léger du même Son, mais dans l'alternation plus ou moins fréquente de deux Sons très-voisins; & quand les sons sont trop éloignés, & que les secousses alternatives sont trop rudes, alors l'ondulation devient chevrottement. [Dictionnaire 1767, 541-542]

Denn erstens kann man der Stimme dieses Vibrato willentlich zufügen oder wegnehmen, wenn man singt, und man singt nicht weniger, wenn man einen einheitlichen Ton ohne jegliche Art von Vibrato aushält. Zweitens unterscheiden sich die Töne der Musikinstrumente in keiner Weise von der Singstimme, was die Natur der musikalischen Töne betrifft und sie erhalten durch dieses Vibrato nichts eigentümliches. Drittens bildet sich das Vibrato in der Tonhöhe und nicht im Timbre. Der Beweis dafür ist, dass, auf der Violine und auf andern Instrumenten, dieses Vibrieren nicht durch ein Schwanken vergleichbar mit der vermuteten Bewegung des Kehlkopfs imitiert wird, sondern durch ein Hin- und Herbewegen des Fingers auf der Saite, die so abwechselungsweise verkürzt und verlängert wird und beinahe un wahrnehmbar zwei abwechselnde Töne hervorverbringt in dem Masse, in dem sich der Finger rückwärts oder vorwärts bewegt. So besteht also das Vibrato, was immer Dodard darüber sagen mag, nicht in einem sehr leichten Schwanken des gleichen Tons, sondern im mehr oder weniger häufigen Abwechseln zweier eng benachbarter Töne. Und wenn diese Töne zu weit entfernt sind und die abwechselnden Schläge zu rau werden, dann wird das Vibrato meckernd.

Vibrato findet gemäss Rousseau in der Tonhöhe und nicht in der Klangfarbe statt. Durch Beobachtung der Entstehungsbedingungen des Vibratos bei Saiteninstrumenten schliesst er auf die Beschaffenheit des Vibratos der Singstimme.

Wie lassen sich aber aus heutiger Sicht Frequenzmodulation, Amplitudenmodulation und "Klangfarbenmodulation" auf der Wahrnehmungsseite auseinanderhalten? Bekanntlich entsprechen sich Empfindungen Tonhöhe, Lautheit, Klangfarbe und ihre physikalischen Korrelate Frequenz, Lautstärke und Spektrum nicht eins-zu-eins: So wird beispielsweise eine geringe Frequenzänderung unter geeigneten Bedingungen nicht als Tonhöhenänderung, sondern als Modifikation der Klangfarbe empfunden [vgl. Houtsma 1997]. Die Stelle zeigt wiederum die Ausrichtung der Aufmerksamkeit auf die Schallquelle, und nicht auf das wahrnehmende Subjekt. Die Möglichkeit einer prinzipiellen Täuschung, die Möglichkeit, dass physikalisch verschiedene Phänomene für die Wahrnehmung ununterscheidbar sind, zieht Rousseau hier nicht in Betracht [vgl. dagn Kap. 3.1.11].

3.3.4. Eulers Erklärung der Klangqualitäten (1765)

Leonhard Euler, *Eclaircissemens plus détaillés sur la génération et la propagation du son et sur la formation de l'écho*, *Mémoires de l'académie des sciences de Berlin*, 21, 1765, 335–363. Wir zitieren im folgenden aus der Euler Gesamtausgabe Serie 2, Band 8. [Euler 1765]

[...] on sait que les sons, quoiqu'ils soyent également graves ou aigus et aussi également forts, admettent encore plusieurs variations et différences, comme sont celles des différentes voyelles, dont personne n'a encore entrepris d'expliquer la nature. [Euler 1765, 547]

[...] man weiss, dass die Töne, auch wenn sie gleich tief oder hoch sind und ebenso gleich stark, sie noch mehrere Varianten und Unterschiede zulassen, wie zum Beispiel diejenigen der verschiedenen Vokale, deren Natur noch niemand zu erklären versucht hat.

Die Formulierung kommt der Negativdefinition der Klangfarbe durch Helmholtz noch näher als diejenige von Rousseau. Den Fachbegriff Timbre scheint Euler allerdings nicht zu kennen. Dies ist ein Indiz, dass die erstmalige Anwendung und Definition von Timbre in diesem Sinn diejenige von Rousseau in der *Encyclopédie* ist. Der Band XVI mit den Artikeln *Son* und *Tymbre* erscheint im gleichen Jahr 1765, sechzehn Jahre nach deren Verfassung.

Wie Rousseau weist Euler darauf hin, dass noch nie versucht wurde, die diesbezüglichen Unterschiede (physikalisch) zu erklären.

Ausgehend von Überlegungen zur Ausbreitung einer Störung des Luftdrucks in einer Orgelpfeife entwickelt er eine Theorie, die an Beeckmans *ictus* anzuknüpfen scheint. Auf Basis der negativen Bestimmung „weder Tonhöhe noch Lautstärke“ gelangt er durch Ausschlussverfahren zu einer neuartigen Erklärung.



Fig. 3.

[Quelle: Euler 1765, 553]

[...] je ne parle pas ici du grave ou aigu des sons, qui est causé par la fréquence de plusieurs trémoussements qui se succèdent les uns aux autres et donc la différence fait le principal objet de la musique. Toutes les autres qualités des sons qui ne se rapportent pas à la succession de plusieurs vibrations ne sauroient dépendre que de la figure des échelles *iqk*, qui caractérisent les agitations

[...] ich spreche hier nicht von der Tiefe oder Höhe der Töne, welche verursacht wird durch die Frequenz mehrerer Erzitterungen, welche aufeinanderfolgen, und deren Unterschied den primären Gegenstand der Musik ausmacht. Alle andern Qualitäten der Töne, welche sich nicht auf die Aufeinanderfolge mehrerer Vibrationen beziehen, können nur von den Kurvenformen *iqk*

propagées dans l'air et en constituent quasi l'essence. Or on comprend aisément qu'une variété infinie peut avoir lieu dans ces figures; et partant il n'y a aucun doute, que toutes les différentes qualités que nous appercevons dans les sons n'en tirent pas leur origine; quoiqu'il soit encore incertain, quelle qualité répond à chaque figure, et s'il a été jusqu'ici si difficile de découvrir la différence qui regne dans la prononciation des divers voyelles, nous voyons à présent que chaque voyelle doit être appropriée à une certaine figure des échelles *iqk*, d'où dépendent aussi toutes les autres variétés que l'oreille peut distinguer dans les sons. [Euler 1765, 557-558]

abhängen, die die Erschütterungen, die auf die Luft übertragen werden, kennzeichnen und die sozusagen deren Essenz ausmachen. Man sieht leicht ein, dass eine unendliche Vielfalt in diesen Figuren stattfinden kann, und es besteht deshalb kein Zweifel, dass alle verschiedenen Qualitäten, die wir in den Tönen bemerken, darin ihren Ursprung finden, auch wenn es noch unsicher ist, welche Qualität jeder Figur entspricht, und wenn es bis jetzt so schwierig gewesen ist, den Unterschied zu entdecken, der die Aussprache der verschiedenen Vokale steuert, sehen wir jetzt, dass jeder Vokal einer dieser Kurvengestalten *iqk* entsprechen muss, von denen auch alle andern Abwandlungen, die das Ohr unterscheiden kann, abhängen.

Die Kurvenbögen *iqk* beschreiben die Dichte der Luft als Funktion des Orts für eine einzelne isolierte Störung. Da die Störung sich mit Schallgeschwindigkeit ausbreitet, entspricht dem Kurvenbogen *iqk* an jeder Stelle, die von der Störung erreicht wird, auch eine korrespondierende Zeitfunktion des Luftdrucks, in der Terminologie von Beekman ein *ictus*. Ein Ton ist eine periodische Abfolge solcher *ictus*, moderner ausgedrückt, ein periodisches Schallsignal. Alle Eigenschaften eines Tons, die von seiner Tonhöhe verschieden sind, hängen vom Signalverlauf zwischen den Nulldurchgängen einer vollen Periode, der Gestalt des *ictus*, ab. Eine Streckung des Signals in Amplitudenrichtung verändert nur die Lautstärke [vgl. das folgende Zitat]. Alle andern Qualitäten (Tonhöhe und Klangqualität) bleiben dabei unverändert. Bei gleicher Maximalauslenkung entscheidet folglich die Kurvenform innerhalb einer Periode über die von der Tonhöhe und Lautstärke verschiedenen Qualitäten eines Tons.

Or, d'abord je remarque que plus ou moins de largeur dans la figure *iqk* ne fait que rendre le son plus ou moins fort, sans en altérer les autres qualités. [...] Mais, si la figure *iqk* changeoit en sorte que quelquesunes de ses appliquées fussent augmentées ou diminuées dans une plus grande raison que d'autres, le son en souffriroit sans doute un changement plus essentiel et il semble que l'expression des lettres consones, dans la voix, dépend d'une telle modification, ou dans la premiere ou dans la derniere des agitations dont chaque syllabe est composées; vu que les consones n'affectent que le commencement ou la fin de chaque syllabe. [Euler 1765, 558]

Ich bemerke zunächst, dass grössere oder kleinere Weite in der Figur *iqk* den Ton nur mehr oder weniger stark macht, ohne die andern Qualitäten zu verändern. [...] Aber, wenn die Figur *iqk* in einer Art ändert, so dass einige der Ordinaten in einem grösseren Mass vergrößert oder verkleinert werden als andere, erleidet der Ton zweifellos eine wesentlichere Änderung und es scheint, dass das Hervorbringen der Konsonanten mit der Stimme von einer solchen Modifikation abhängt, entweder in der ersten oder letzten Erschütterung, aus denen jede Silbe zusammengesetzt ist, denn die Konsonanten beeinflussen nur den Anfang oder das Ende jeder Silbe.

Euler interpretiert also Konsonanten als Modifikation der Schwingungsgestalt in der ersten und letzten „Schwingungsperiode“.

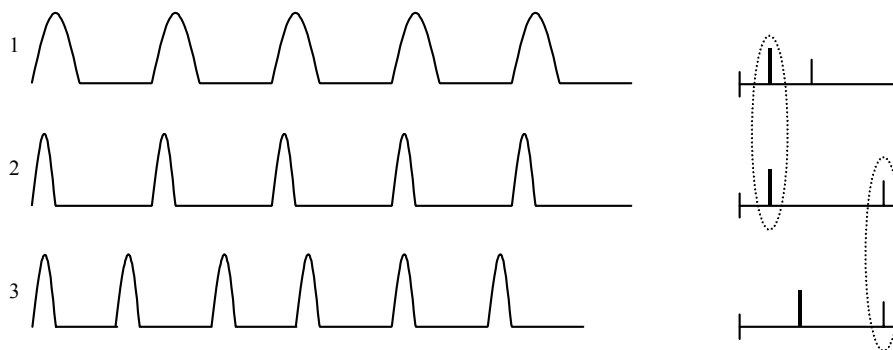
Mais la longueur *ik* de chaque agitation *iqk* est invariable, non seulement dans le tuyau, mais aussi dans l'air libre, d'où l'on peut conclure qu'une qualité plus essentielle des sons en dépend, qui demeure la même, pendant que la force va en diminuant. Peut-être que c'est dans cette longueur *ik* qu'il faut chercher la cause des différentes voyelles; qui dans ce cas ne diffèrent entre'elles que du plus au moins. Si cela ne paroissoit assez

Aber die Länge *ik* einer jeden Erschütterung *iqk* ist unveränderlich, nicht nur in der Orgelpfeife, sondern auch in der freien Luft, woraus man schliessen kann, dass eine wesentlichere Qualität davon abhängt, die die gleiche bleibt, während die Stärke abnimmt. Vielleicht ist es in dieser Länge, in der man die Ursache für die verschiedenen Vokale suchen muss, die sich in diesem Fall nur in einem mehr oder weniger unterschieden. Falls dies

conforme à la vérité, il faudroit recourir aux différentes figures des échellees *iqk*, où l'on trouveroit principalement à distinguer celles qui n'ont qu'un ventre de celles qui en ont deux ou trois ou plusieurs; d'où sans doute doit résulter une différence très essentielle dans les sons. [Euler 1765, 558-559]

nicht genügend mit der Wirklichkeit übereinstimmen sollte, müsste man auf die verschiedenen Figuren der Bögen *iqk* zurückgreifen, wo man in erster Linie diejenigen, die nur einen Bauch haben, von denjenigen zu unterscheiden hat, die zwei drei oder mehrere haben; wovon zweifellos ein sehr wesentlicher Unterschied in den Tönen herrührt.

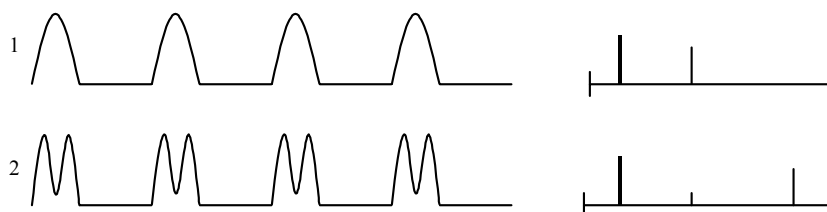
Als primäre Unterscheidungskriterien vermutet Euler offenbar die Dauer eines Tonimpulses (*ictus*) im Vergleich zur Periode und die Anzahl Nulldurchläufe pro Periode.



Impulsschwingungen und Formantfrequenzen. Die Impulsbreite bestimmt die Hauptformantfrequenz. Die Beispiele 1 und 2 haben die gleiche Tonhöhe, bei 2 tritt wegen der halben Impulsbreite die Oktave des Hauptformanten aus 1 besonders hervor. Die Beispiele 2 und 3 haben die gleiche Impulsbreite, die Grundfrequenzen stehen im Verhältnis einer Quarte. Sie stimmen in der Frequenz ihres Hauptformanten überein. Die schematischen Spektren (rechts) zeigen nur die Grundkomponente und den Hauptformanten. Die Fourieranalyse gibt in allen Fällen unendlich viele Teiltonkomponenten.

Je nach Breite des Impulses resultiert bei gleicher Periodendauer ein andere Vokalqualität. Dieses Merkmal des Kurvenverlaufs erlaubt eine eindimensionale Klassifizierung der Klangqualität.

In der Tat hängt bei periodischen Impulsfunktionen die Impulsdauer mit der Lokalisierung von Formanten zusammen. Falls ich die obige Stelle richtig verstehe, gibt Euler also eine Erklärung der Vokale, die zu einem Spezialfall der Formanttheorie der Vokale äquivalent ist. Falls die Impulsbreite zur Charakterisierung nicht ausreichen sollte, könnten gemäss obigem Zitat noch andere geometrische Merkmale des Kurvenverlaufs wie die Anzahl Richtungswechsel innerhalb eines Impulses beigezogen werden:



Bei Beispiel 2 tritt im Vergleich zu 1 die Oktave der Formantfrequenz hervor.

Eulers Theorie ist eine reine Zeittheorie losgelöst von jeglicher spektraler Interpretation. Sie behauptet eine 1:1-Entsprechung zwischen geometrischer Schwingungsform und Klangqualität. Die Möglichkeit, dass verschiedene Schwingungsformen der gleichen Qualitätsempfindung zugrundeliegen könnten, zieht er nicht in Betracht. Eine spektrale Theorie, die für die Klangqualität allein die Partialamplituden der Sinuskomponenten und

nicht ihre gegenseitige Phasenlage verantwortlich macht [vgl. Helmholtz, Kap. 5], impliziert demgegenüber zwingend, dass bei gleicher Klangqualität verschiedene Schwingungsformen möglich sind.

Ein spektraler Ansatz kommt für Euler schon deshalb nicht in Frage, weil er zeitlebends die von Daniel Bernoulli behauptete Gültigkeit des späteren Theorems von Fourier bestreitet [vgl. Kap. 3.1.5 und 3.1.6].

Eulers Erklärungsmuster ist nur auf strikt periodische Schallsignale anwendbar. Für stationäre Schallsignale, die unter ihren Sinuskomponenten nicht harmonische Bestandteile haben, sind die obigen geometrischen Korrespondenzen nicht konstruierbar. Bei solchen verändert sich nämlich die Schwingungsform fortwährend. Es ist anzunehmen, dass solche Signale für Euler nicht unter den Begriff des Tones mit konstanter Klangqualität fallen. Sie müssten entweder als Überlagerung mehrerer Töne oder als Einzeltöne mit modulierender Klangqualität interpretiert werden. In der spektralen Darstellung verschieben sich dabei die Frequenzlinien nur geringfügig.

3.3.5. Tonfarbe, eine frühe Belegstelle bei Herder (1768)

Die Wortsuche in den Literaturbeständen der digitalen Bibliothek auf CD-ROM liefert für *Klangfarbe* und *Tonfarbe* keine Treffer im 18. und frühen 19. Jahrhundert. Goethe, Heine, Herder, Hoffmann, Jean Paul, Schopenhauer, Tieck, Wackenroder wurden auf Stellen abgesucht, bei denen Ton/Klang und Farbe/Licht – auch als Wortbestandteile – nahe beieinander auftreten. Die Werke der Autoren sind leider nicht immer vollständig erfasst. In „Ueber die neuere deutsche Literatur. Fragmente“ 2. Aufl. 1768 von Johann Gottfried Herder (1744-1803) kann ein vereinzelt Auftreten des Begriffs *Tonfarbe* nachgewiesen werden. Die Deutung der Textstelle wird in Beziehung zu Artikeln in Johann Christoph Adelungs „grammatisch-kritisches Wörterbuch der Hochdeutschen Mundart“ [1796] gebracht.

Eine semantische Gleichsetzung von *Timbre* und *Tonfarbe* wäre für dieses frühe Auftreten des Begriffs *Tonfarbe* problematisch:

Mehr als alle todte Proportion der Buchstaben und alle künstliche Struktur der Sylbenmaaße geben kann, giebt uns der **lebendige Wohl laut**, der in unserer Sprache liegt, und ihr das höchste Lob einer ursprünglichen Sprache giebt. Alle Wurzeln derselben, sie mögen Verba, oder Nomina sein, **malen**; sie lassen das Wesen und die Beschaffenheit der Sache im **Klange** hören; sie sind im lebendigen Anschauen derselben gebildet. Man laufe die Reihe dieser **Klangworte** durch: oder besser, man empfinde den **Wohl laut** derselben in unseren Dichtern, die nicht schrieben, sondern sangen, unter welchen ich Klopstock, Hagedorn, von Gerstenberg, und in seinen Cantaten auch Ramlern, besonders nenne: man gehe z. E. die Uebersetzung durch, die der letzte von Dryden's Ode auf die Musik geliefert; alsdenn erinnere man sich, wie weit Brockes und andere diesen **lebendigen Wohlklang** haben übertreiben *können*: und man wird wie ich hoffe, nicht mehr an der **malenden Musik** zweifeln, die man überall in den tiefsten Fundgruben der Sprache, in ihren einfachsten Formen findet, aus welchen sie in die Zusammensetzungen übergeht. Seligkeit und Wollust fühlet das Ohr, wenn es diesen **Wohl laut** seiner Sprache mit langen Zügen trinken kann, wenn es Macht und sanfte Schwäche, Süßigkeit und Würde, Langsamkeit und Schnelle, Geräusch und Stille, Bewegung und Anstand sich aus Tönen vorbilden höret, wenn es alle diese **Tonfarben** in dem innern Bau der Wörter findet, ohne daß Dichter dieselbe einzwingen dorften. Wahrlich! die schönsten und edelsten **Klangworte** unserer Sprache sind erschaffen, wie ein **Silberton**, der in einer reinen Himmelsluft auf einmal ganz hervor tritt; sie wurden bei ihrer Geburt in das süße Meer des **Wohl lautes** getaucht, und sind, wie im lebendigen Gefühl der Sache, gebildet. Wohl den Schriftstellern unter uns, die da schreiben, als ob sie hören, die da dichten, als ob sie singen. [Herder 1768, Suphan II, 39-40; fette Hervorhebungen dm, kursive sind original]

Das Klangliche der Wörter der deutschen Sprache zeichnet diese als eine ursprünglich naturverbundene aus. Die Wurzeln der Verben und Substantive malen, das heisst ihr Klang bringt ihre Bedeutung – das Wesen und die Beschaffenheit des Signifikats – unmittelbar zur Darstellung. Zeichen und Bezeichnetes stehen im Einklang.

Signifikat	Signifikant	Wahrnehmung	Empfindung
Macht – sanfte Schwäche Süssigkeit – Würde Langsamkeit – Schnelle Geräusch – Stille Bewegung – Anstand	Tonfarben sind im inneren Bau der Wörter reflektiert	Wohllaut	Seligkeit Wollust

Die ausgedrückten Inhalte sind in Gegensatzpaaren angeordnet – Anstand, in einer heute ungebräuchlichen Bedeutung, ist Gegensatz zu Bewegung das heisst Substantivierung von anstehen im Sinne von warten –, diese sind aber nicht auf Klangfarbendimensionen wie bei Rousseau abbildbar.

Die *Farbe* im Kompositum *Tonfarbe* stiftet den Zusammenhang zur Malerei. Farbe ist Mittel der Malerei und dient der Differenzierung. Für das von Herder gemeinte Malen ist der Prozess und nicht das Ergebnis das Entscheidende. Die Wörter leben durch ihren Klang, nicht durch ihre schriftliche Repräsentation. Wahre Poesie ist deshalb Klangkunst.

Silber im Kompositum *Silberton* bezieht seinen edlen, malenden Charakter sowohl aus der Farbassoziation als auch aus dem zugehörigen Material. Das eröffnende *s*, die Vokale *i* und das offene *e* in Silber bringen mit ihren hochfrequenten Klangbestandteilen die Helligkeit des Materials und des Klangs zum Ausdruck. [Die Herkunft des Wortes Silber ist unklar, vermutlich stammt es aus einer nicht indogermanischen Sprache, Der Grosse Duden, Herkunftswörterbuch 1963, 664] Das Französische *argent* – das von Rousseau in *Emile* als Adjektiv zu *timbre* etwa zur gleichen Zeit verwendet wird – eignet sich demgegenüber weniger für eine klangmalende Auslegung der Helligkeit: die beiden Nasallaute und der Doppelkonsonant mit dem breitbandigen Zischlaut stehen dem entgegen.

Ton, Wortbestandteil von *Tonfarbe* und *Silberton*, bringt durch das lange *o* und den stimmhaften Schlusskonsonanten *n* selbst einen dauerhaften Ton mit konstanter Tonhöhe zum Ausdruck. Die Betrachtung der Phoneme der Wörter bei ihrer klanglichen Ausdeutung ist im Sinne von Herder [vgl. Herder 1768, Suphan II, 33-35], er unterzieht aber die in unserem Zusammenhang interessierenden Begriffe keiner solchen Deutung.

Die Farbe als Oberflächenstruktur der Wörter der deutschen Sprache steht Herders Auffassung zufolge mit ihrer Tiefenstruktur (der Bedeutungsebene) in Übereinstimmung. Der Ton einer silbrig übermalten Eisenglocke wird in seiner Inkongruenz zwischen Tiefen- und Oberflächenbeschaffenheit noch nicht zum *Silberton*.

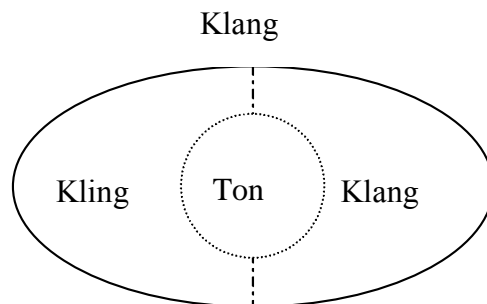
Herder ist der Auffassung, dass die Substantive bei der Entstehung der Sprache keinen Vorrang über die Verben hatten. Verben zu Verlaufsqualitäten können durch Wörter, die selbst klingende Prozesse sind, unmittelbarer veranschaulicht werden als Substantive, die statische Objekte bezeichnen und klassifizieren. Sprache bei Herder ist überspitzt formuliert konventionalisierte Klangmalerei.

In den Lexika von 1835 koexistieren *Klangfarbe* und *Tonfarbe* als gleichberechtigte Übersetzungen des französischen *timbre*. Und *Klangfarbe* ist vor 1822 nicht nachweisbar [vgl. Peter Jost, 2001]. Seit etwa 1860 ist *Klangfarbe* der akzeptierte Fachterminus im Deutschen. Weshalb aber setzt sich *Klangfarbe* und nicht *Tonfarbe* durch? Ein Blick in das „Grammatisch-kritisches Wörterbuch der Hochdeutschen Mundart von Johann Christoph Adelung“ [1796] zeigt am Beispiel von *Klang* und *klingen*, dass obige onomatopoetische

Auslegung der deutschen Wörter nicht aussergewöhnlich für das ausgehende 18. Jahrhundert ist. Gleichzeitig ergeben sich daraus auch Gründe für die terminologische Unsicherheit im Deutschen.

Der **Klang**, des -es, plur. die Klänge, ein klingender, d. i. angenehm und hell lautender Schall oder Laut von einiger Dauer; eine Onomatopöie dieses Schalles selbst, welche sich, so wie alle Wörter dieser Art, besser empfinden als beschreiben lässt. [...] Aus der Vergleichung mehrerer Klänge entsteht der Begriff eines Tones, S. dieses Wort. In engerer Bedeutung bezeichnet es zuweilen den Klang der Glocken. Ohne Klang und Gesang begraben werden, ohne Läutung der Glocken und ohne Gesang. [...] Klink, klank ist ein im gemeinen Leben üblicher unabänderlicher Redetheil, einen Schall dieser Art durch Nachahmung auszudrücken; wo denn das erstere Wort wegen des feinem und rundern i einen kleinern feinem, das letztere aber wegen des breitem a einen größern oder stärkern Klang ausdrucket. Hierin liegt zugleich der Grund von Hrn. Stoschens ganz richtigen Bemerkungen, daß klingen und einen Klang haben nicht alle Mahl völlig gleich bedeutend sind, obgleich Klang das Abstractum des Zeitwortes ist. Von großen Glocken wird man lieber sagen, sie haben einen guten Klang, als sie klingen gut. [Adelung, 1796, Klang]

Die Flexion des Verbs bewirkt also eine Änderung der Farbe! Nimmt man die onomatopoetische Komponente des Wortes *Klang* ernst, ergibt sich für das Kompositum Klangfarbe im Vergleich zu Tonfarbe – wenn Ton in seiner heutigen Bedeutung genommen wird – eine zu enge Bedeutung, da die hellen Töne nicht erfasst werden; sie müssten ja mit der sprachlich inkorrekten Wortbildung *Klingfarbe* beschrieben werden. Es geht allerdings aus Adelungs Definition nicht hervor, ob jeder Klang zwingend eine und wenn ja eine einzige Tonhöhe hat. Die Problematik wird am folgenden Mengendiagramm der Begriffsextensionen illustriert:



die dunklen. Nicht jeder Klang ist ein Ton – nicht alle Klänge sind vergleichbar, falls sie keine eindeutige Tonhöhe haben. Ton ist dann echter Unterbegriff des Oberbegriffs Klang. „Kling-Klänge“ und „Klang-Klänge“ können, müssen aber nicht immer auch Töne sein. In Zusammenhang mit einer noch allgemeineren für Adelung zu unspezifischen Bedeutung von Klang, erwähnt er auch mehrere Komposita mit dem Wortbestandteil Klang:

Ehedem wurde dieses Wort [Klang] zuweilen in weiterer Bedeutung für Schall, Knall u. s. f. gebraucht, wovon Frisch einige Beyspiele anführet, und wovon auch die Zusammensetzungen Wohlklang, Mißklang, Übelklang, Nachklang u. s. f. zeugen. [Adelung, 1796, Klang]

Die aufgeführten Zusammensetzungen dienen der Klassifikation von Klang in seiner allgemeinsten Bedeutung. *Missklang* ist eine Kontradiktion, wenn Adelungs Definition der engeren Bedeutung zu Grunde gelegt wird: Ein Missklang ist kein „angenehm und hell lautender Schall“. Aber auch ein „Klang-Klang“ ist nicht „hell lautend“. Klangfarbe verstanden als Qualitätsmerkmal zum abstrakten Begriff Klang verlangt im Unterschied zu Adelungs Beispielen von Komposita den Wortbestandteil Klang an erster Stelle des Kompositums: die *Farbe eines Klangs*.

Herder verwendet mit *Klangwort* eine weitere ungewöhnliche Wortzusammensetzung. Hier nimmt *Klang* sogar die erste Stelle ein, es ist damit aber nicht das *Wort eines Klanges* als Klangattribut sondern vielmehr ein *klingendes Wort* – ein Wort das im Sinne von Herder *malt* – gemeint. Dieses ist aber bereits im 17. Jahrhundert in Gebrauch. Spaten führt es unter den zahlreichen Komposita von *Wort* „Schall-, Klang- & Donwort/ onomathopæumenon, i.e. verbum à sono factum“ [Spaten 1691, 2579] an.

Komposita mit Klang: Geigenklang, Gläserklang, Guter Nachklang (bona fama), Harfenklang, Ohrenklang (tinnitus, susurrus aurium), Saitenklang, Schellenklang, Silberklang, Wunderklang, Ubelklang, Wolklang, Zimbelklang, Glockenklang [Spaten 1691, 982]

3.3.6. Sulzer: Timbre = Ton? (1774)

Ton. (Musik) Dieses Wort wird selbst in der Musik, wo es seine eigentliche Bedeutung vorzüglich behält, dennoch von ganz verschiedenen Dingen genommen. ¹. Bedeutet es den Klang der Instrumente überhaupt, als den besondern Klang einer Flöte, einer Violine u.s.f. Denn man sagt von einem solchen Instrument, es habe einen schönen, hellen, vollen, oder einen schlechten, dumpflichten, unangenehmen Ton. Es wäre der Mühe wol werth, daß man versuchte die verschiedene Arten des Tones, nach dem eigenthümlichen Charakter jeder Art, zu bestimmen. Der Ton der menschlichen Stimme wird durchgehends mit Recht für den vollkommensten gehalten, weil er jeden Charakter annehmen kann. Blas-Instrumente haben offenbar einen ganz andern Charakter des Tones, als Sayteninstrumente, und von diesen ist der Ton derer, die gestrichen werden, wieder von dem, der durch das Anschlagen oder Zupfen der Sayten hervorgebracht wird, ganz verschieden. Es giebt Instrumente die einen klagenden Ton haben, andre haben einen fröhlichen. Wo es darum zu thun ist, den Menschen durch Töne in wirkliche Leidenschaft zu setzen, kommt sehr viel auf die gute Wahl des Instruments an, das den schicklichen Ton dazu hat. [Allgemeine Theorie der schönen Künste, Bd. 2, 1156]

Die weiteren Bedeutungen des Begriffs Ton sind gemäss Sulzer ein „Klang von bestimmter, oder abgemessener Höhe“, das Intervall „einer einzigen diatonischen Stufe“ und „die ganze Tonleiter, oder diatonische Folge der acht zur Octave eines jeden Tones gehörigen Sayten“ in dieser Reihenfolge. Neben der Verwendung des Begriffs Ton im Sinne von Rousseaus *tymbre* gebraucht Sulzer im obigen Zitat auch *Charakter des Tons* in gleicher Bedeutung. Ton wird dabei in der zweiten Bedeutung als Klang mit bestimmter Höhe gebraucht. Im Unterschied zu Mattheson nimmt Sulzer die Mehrdeutigkeit des Begriffs Ton in Kauf und scheut auch nicht davor zurück, ihm eine weitere an erster Stelle genannte Bedeutung zu verleihen.

3.4. Inharmonische Teiltöne

Schon 1636 beobachtet Mersenne an Glocken inharmonische Teiltöne [*Expliquer pourquoi vne mesme Cloche fait plusieurs sons differents en mesme temps*, Mersenne 1636/VII, Des instruments de percussion, 36]. Im Idealfall verhalten sich ihm zufolge die Teiltonfrequenzen wie 2 : 4 : 5 : 6, bei vielen Glocken bilde sich aber statt der grossen Dezim 2 : 5 die Undezim. Daraus ergibt sich die fortlaufende Proportion 3 : 6 : 8 : 9, die dem Akkord *g-g'-c''-d* entspricht. Die Tonigkeit des Haupttons (*g* = 3) stimmt dabei nicht mit derjenigen der Periodizität (*C*=1) überein. Mersenne gibt nicht diese fortlaufende Proportion an, sondern interpretiert die Undezim als Unvollkommenheit und vermutet einen Zusammenhang zwischen der Form und dem Teiltonspektrum einer Glocke. Die Interpretation der Undezim als inharmonischer – verstimmter – Teilton scheint daher gerechtfertigt. Verglichen mit den üblichen harmonischen Obertonreihen fehlt der „idealen Glocke“ im Sinne von Mersenne ihre Grundfrequenzkomponente. Aber immerhin hat der tiefste Ton die richtige *Tonigkeit*.

Mersenne gibt somit antizipierend ein Gegenbeispiel zu Rameaus Auffassung, wonach alle klingenden Körper zwingend eine Obertonreihe mit ganzzahligen Frequenzvielfachen zum Grundton ausbilden. Rameau scheint Mersennes Beobachtungen an der Glocke nicht zu

kennen und zählt die Glocke zu den Instrumenten, die wie die Saite eine harmonische Obertonreihe hervorbringen [Rameau 1726, 17; vgl. Kap. 3.1.3].

Wie bereits erwähnt berechnet Daniel Bernoulli 1742 approximativ die inharmonischen Eigenfrequenzen des schwingenden Stabes und kann bei den zugehörigen Experimenten auch die Superposition mehrerer Schwingungsmoden beobachten [Cannon et al. 1981, 93-103]. Der „ideale schwingende Stab“ hat naturgemäss ein inharmonisches Teiltonspektrum. Fünf Jahre nach Rameaus *Génération harmonique* ist Rameaus Auffassung von der Allgegenwart der harmonischen Teiltonverhältnisse bereits widerlegt. Die Extension des Begriffs *Corps sonore* im Sinne von Rameau schrumpft. Rameaus physikalistischem Ansatz bleiben als Repräsentanten dafür nur noch die schwingende Saiten und Pfeifen. Euler behandelt 1764 die inharmonischen Teiltöne der Glocke. [Euler 1764b]

3.4.1. Chladni (1787)

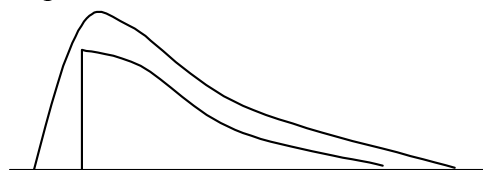
Es ist Chladnis Verdienst, die inharmonischen Teiltonverhältnisse für verschiedenste Körper systematisch beobachtet und visualisiert zu haben. Er verwendet seine Beobachtungen als Attacke gegen die monokausale Erklärung der Harmonie durch Rameau.

An elastischen Stäben und Blechstreifen, wie auch an Ringen, Scheiben, Glocken und dergleichen klingenden Körpern, sind sowohl die Verhältnisse der verschiedenen Töne des nämlichen Körpers, als auch der gleichartigen Töne an verschiedenen Körpern sehr von denen unterschieden, die an Saiten Statt finden. [Chladni 1787, 3]

Am Beispiel der Glocke verweist Chladni auf eine verbreitete falsche Deutung ihrer Klänge als kontinuierliche Überlagerung von Schwingungen elastischer Ringe:

Auch andere Schriftsteller, die etwas über die Schwingungen einer Glocke sagen, bedienen sich einer solchen Erklärungsart, und äussern die unbegründete Meynung, als ob jeder dieser Ringe einen andern Ton gebe, der Ton des äussersten Ringes aber der tiefste und stärkste sey, und die ganze Harmonie (oder vielmehr äusserste Disharmonie) dieser unendlich vielen Töne gleichsam einen Ton ausmache. [Chladni 1787, 35 Fussnote]

Nach Ansicht dieser „andern Schriftsteller“ entspricht einem Glockenklang ein kontinuierliches Frequenzspektrum mit dominierender tiefster Frequenz der folgenden Art:



Ein solches Spektrum mit steiler linken Flanke ist sehr ähnlich wie die Verdeckungsfunktion eines Sinustons auf der Basilarmembran. Es ist deshalb möglich, dass ein solches kontinuierliches Spektrum als Einzelton empfunden wird. Dann nämlich, wenn die Spektralfunktion unterhalb der Verdeckungsfunktion verläuft. (Die Breite des Verdeckungsbereiches eines Sinustons hängt von der Lautstärke ab. Weiter ist die linke Flanke immer sehr steil. Deshalb werden in der Regel höhere von tieferen Tönen verschluckt und nicht umgekehrt.) Chladni stellt im Unterschied zu der von ihm kritisierten Auffassung bei Glocken eine Menge von diskreten Eigenfrequenzen fest, die nicht ganzzahlige Vielfache einer Grundfrequenz sind. Dabei gilt wie für Saiten das Superpositionsprinzip:

Wenn an Stäben, Scheiben, Glocken und andern elastischen Körpern, wo die höhern Töne in andern Verhältnissen stehen, als an einer Saite, mehrere Töne zugleich klingen, so sind es schlechterdings keine andern, als die, welche der nämliche Körper einzeln geben kann. [Chladni 1787, 70]

Jeder in einem Körper mögliche „Klang“ ist eine Überlagerung seiner Eigenschwingungen. Je nach Art und Ort des Anschlages resultiert eine unterschiedliche Stärke der einzelnen Komponenten. Die Menge der möglichen Frequenzen ändert sich dabei aber nicht.

Wenn man also gewusst hätte, daß es klingende Körper gebe, bey denen die höhern Töne in ganz andern Verhältnissen, als bey der Saite, und grösstentheils in unharmonischen und irrationalen Verhältnissen stehen [...], so würde gewiß niemand auf den Einfall gerathen seyn, aus dem Mitklingen der mit der natürlichen Reihe der Zahlen übereinkommenden Töne bey dem Grundtone einer Saite auf die Coexistenz dieser Töne bey einem jeden andern Klang zu schließen, und dieselbe als ein wesentliches Unterscheidungskennzeichen eines Klanges von jedem andern Schalle anzusehen, oder wohl gar alle Grundsätze der Harmonie daraus herzuleiten. [Chladni 1787, 70-71]

Dies kann durchaus als eine Frage der Definition angesehen werden. Helmholtz definiert später den psychoakustischen Fachbegriff des *musikalischen Klang* als Gehörsempfindung zu einem periodischen Schalldruckverlauf. [Vgl. Kap. [5.3](#)]

Die Chladnischen Klangfiguren erlauben Schall mit konstanter spektralen Zusammensetzung, das heisst periodische und quasi-periodische Luftdruckverläufe, zu visualisieren. Bettine Menke [1999] spricht in diesem Zusammenhang von „Autoskriptualität des Schalls“, da sich dieser ohne vermittelnde Zeichen selbst aufschreibe. Wenn nämlich die Frequenzzusammensetzung des Schalles, die Menge der Eigentöne, während des Klingens nicht ändert, „zeichnet sich“ im aufgestreuten Sand ein Muster, das nach dem Verklingen erhalten bleibt. Die Klangfiguren als Spuren musikalischer Klänge erinnern in ihrem Ornamentcharakter an eine von Descartes ausgesprochene Modellvorstellung der Sinnesreizungen als einem Siegel eingeprägte Konstellationen. Die gleiche schwingende Membran in eine andere Art zu schwingen versetzt, erzeugt andere Ornamente, was eine andere Klangfarbe im Sinne von Helmholtz impliziert. Die optische Farbe war bei Descartes in der Feinstruktur der Partikel kodiert, und diese teilt sich dem Sinnesorgan durch direkten physischen Kontakt als Abdruck mit. Die geometrische Konstellation der Klangfigur als in der Zeit gefrorene Klangfarbe kann – unter Voraussetzung des Wellenparadigmas – mit dem Anregungszustand des Hörorgans (des Trommelfells oder der Basilarmembran) verglichen werden. Die Klangfigur gerät dabei zur Metapher für die Klangfarbe und transformiert Farbe in Zeichnung. Farbe scheint dabei in ihrem Wesen von einem rein Qualitativen in ein quantitativ Vermessbares zu mutieren.

4. Das Wesen des Tons und das Aufscheinen der Klangfarbe

Die erste Hälfte des 19. Jahrhunderts ist von zwei aus unserer Sicht einschneidenden gleichzeitigen Ereignissen geprägt. Der *Satz von Fourier* und das Auftauchen des Begriffs *Klangfarbe*.

Fourier gibt 1822 den Tatbeweis für Bernoullis Vermutung, dass periodische Schwingungen als trigonometrische Reihen von Sinus- und Cosinusschwingungen dargestellt werden können, indem er ein Berechnungsverfahren für die Stärke der Sinus- und Cosinusbestandteile angibt. Diese Sinus- und Cosinusanteile können durch eine einfache Umformung in eine Amplituden- und eine Nullphaseninformation umgewandelt werden. Simon Ohm verwendet Fouriers Rechenverfahren, um zu entscheiden, ob ein bestimmter Teilton in einem periodischen Klang als „reeller Bestandtheil“ enthalten ist, und behauptet, dass einfache Töne und Sinusschwingungen sich 1 : 1 entsprechen.

August Seebeck verfährt demgegenüber eine Zeittheorie, die auch von der Sinusform abweichende Schwingungen als Töne zulässt und bringt dazu Argumente, die später in die Theorie der Residualtöne einfließen werden. Das mathematische Verfahren der Fourierzerlegung mündet also in einen Streit über die Definition des Tons. Die Zeittheorie geht daraus als vorläufige Siegerin hervor. In der zweiten Jahrhunderthälfte wird Ohms Position von Hermann und Seebecks Position von Koenigs verfochten [vgl. Kap. 6]. Helmholtz ist diesbezüglich oft missverstanden worden. Sein Standpunkt wird in Kap. 5 diskutiert.

Weiterhin Thema sind die Interferenzerscheinungen. Hällström findet und begründet – via Impulsmustervergleich – die heute akzeptierten Berechnungsformeln für die Frequenzen der *Differenztöne* erster und höherer Ordnung. Helmholtz erklärt die Kombinationstöne (Differenz- und Summentöne) als Folge nicht-linearer Verzerrungen, die bei grossen Lautstärken sowohl in der Luft als auch mechanisch im Gehör entstehen können. Ohms Unterscheidung in *bedingte* und *unbedingte Kombinationstöne* ist diejenige in *Differenztöne* und *Periodiktöne*. In Kooperation hätten Ohm und Seebeck ohne Weiteres den Stand von Schouten [1938] erreichen können. Letzterem stand mit der optischen Sirene – zumindest was die Amplitudenverhältnisse anbelangt – eine über Ohms Zweifel erhabene elektro-akustische Schallquelle zur Verfügung. Youngs Gleichsetzung von schnellen Schwebungen mit Periodiktönen erhält dadurch ein neues Gesicht. Schouten et al. [1962] geben denn auch eine Neufassung des Ohmschen Gesetzes, das dem von Seebeck behaupteten Zusammenwirken von Teiltönen hoher Ordnungszahl Rechnung trägt [vgl. Kap. 6.12.1].

Die Diskussion über das Wesen der Töne wird bis zur Jahrhundertmitte vornehmlich aus einer technologisch orientierten Perspektive, ohne eigentliche gehörphysiologische Fundierung, geführt. Die Positionen scheinen sich deshalb mehr von der „Wahrheit“ zu entfernen als hundert Jahre zuvor. Die zunehmende Bedeutung und Komplexität der Einzeldisziplinen ist wohl dafür mitverantwortlich. Für die Basilarmembran kann, wenn man sie als schwingendes System ansieht, keine der schwingenden Saite vergleichbare einfache Bewegungsgleichung aufgestellt werden. Sie kann im 19. Jahrhundert auch nicht *live* in Aktion beobachtet werden. Möglicherweise ist das Schweigen über die Mechanik des Hörens eine Absage an die Spekulation. Seebecks Beobachtungen und Überlegungen sind aber im besten Sinne psychoakustisch, da sie das Wahrnehmungsobjekt Ton, mit seiner mathematisch physikalischen Repräsentation vergleichen.

Erst das „Universalgenie Helmholtz“ [Krüger 1994] überspringt die Schranken der Einzelwissenschaften scheinbar mühelos, er wagt sogar Schritte in die allgemeine Musiktheorie und in seiner Auseinandersetzung mit Johannes Müller (1801-1858) und Emmanuel Kant in die Erkenntnistheorie [Warren, Warren 1968, 84-85; Schulisch, 1982, 42-49; Meyering 1987, 132-142]. Bezüglich der Bewegung der Basilarmembran unterliegt Helmholtz allerdings dem gleichen Irrtum wie de Mairan, wohl irregeleitet durch die *Cembalo-* bzw. *Harfenmetapher* des Resonanzsystems. Auf der Basilarmembran kann es gemäss Békésy und der heute allgemein akzeptierten Lehrmeinung gar nicht zu stehenden Wellen (frei schwingenden Harfensaiten) kommen, da sie gar nicht unter Spannung steht, sondern es kommt zu Wanderwellen [Békésy 1946, 452, 455]. Die Auslösung der Nervenimpulse ist die Folge ihrer temporären Formänderung.

Dem Mechanismus der Energieabsorption auf der Basilarmembran kämen, bildhaft gesprochen, *im Sande verlaufende Wasserwellen* näher, ihre Bewegung ist vielleicht eher mit einer *im Wind flatternden Fahne* (Windrichtung parallel zur Aufhängung) vergleichbar. Beide Vergleiche hinken, der erste wegen der Frequenzlokalisierung, der zweite wegen des Mediums: Die Cochlea ist nicht mit Luft, sondern mit Flüssigkeit gefüllt, und diese kann um das apikale Ende, die Schneckenspitze herumströmen [Pierce 1989, 87-93].

Gleichzeitig mit Fouriers Durchbruch auf dem Gebiet der Spektralanalyse erhält der französische Begriff *timbre* mit dem Kunstwort *Klangfarbe* eine deutsche Entsprechung, die sich in der zweiten Jahrhunderthälfte als wissenschaftlicher Fachbegriff etablieren wird. Der Begriff erscheint nach heutigem Wissensstand erstmals im Jahr 1822 bei Gottfried Weber [Jost 2001, 181] und in seinem Artikel *Akustik* in Gustav Schillings *Encyclopädie der gesammten musikalischen Wissenschaften oder Universal-Lexicon der Tonkunst* 1835. In Kapitel [3.3.5](#) habe ich ein vereinzelt Auftreten von *Tonfarbe* bei Herder im Jahr 1768 nachgewiesen. Im Jahr 1817 verwendet Weber noch *Tonfarbe* [Jost 2001, 182]. Berlioz *Traité* als Handwerkslehre für den Umgang mit der Klanglichkeit des Musikinstrumentariums ist für terminologische Studien, da es nach einem partiellen Vorabdruck (1841/42) dreisprachig französisch, deutsch und italienisch erschien, besonders aufschlussreich. Wegen der schlechten Verfügbarkeit der Erstdrucke wurde der Vorabdruck Berlioz [1841/42] konsultiert, für Textvergleiche wurde die erste autorisierte deutsche Übersetzung von Alfred Dörffel [Berlioz 1864] und die im fotomechanischen Nachdruck greifbare erweiterte französische Ausgabe [Berlioz 1867] beigezogen.

Berlioz verwendet das Wort *timbre* bei der Charakterisierung fast aller Instrumente, die eine eindeutige Tonhöhe erkennen lassen, auch für Glocken. Dörffel übersetzt *timbre* einmal im Zusammenhang mit der Orgel als *Klangfarbe* und verwendet den Begriff ein weiteres Mal für *coloris*.

Wackenroders Beitrag von 1799 diskutiert eine Korrespondenz zwischen Klangfarbe und Farben, ohne den Begriff zu verwenden. Neben der allgemeinüblichen Kritik am Farbenklavier von Père Castel beinhaltet der Text antizipierend auch eine Kritik am Schönbergschen Begriff der *Klangfarbenmelodie* [1911], so wie er von Lehrdahl [1987] ausgelegt wird. Das minimalistische Prinzip der Klangfarbenvariation bei Konstanthalten aller anderer Klangparameter findet bei Lehrdahl zeitgeistbestimmt eine andere Bewertung und verdankt ihre Realisierbarkeit, der totalen elektroakustischen Kontrolle über Signalverlauf und Klangspektrum. Berlioz' visionäre Deutung der einzelnen Orchesterinstrumente als Bestandteile eines Metainstruments, das vom Dirigenten am Mischpult – unter Aufsicht des Komponisten – angesteuert wird, scheint heute mehr als wirklich geworden zu sein.

Im Sprachgebrauch von Jean Paul findet sich eine ähnliche Personalisierung des Tons wie bei Berlioz, die Farb/Ton-Metaphorik führt trotz der unzähligen Komposita und trotz seiner Erwägungen zum Begriffsreichtum der deutschen Sprache nicht zur Klangfarbe. Lohnenswert unter dem Gesichtspunkt der Farbe/Ton-Problematik wäre ein detaillierteres Eingehen auf Jean Pauls *Vorschule der Aesthetik* [1806], als es hier möglich ist.

Auch bei E.T.A. Hoffmann lassen sich synästhetisch aufgeladene Textpassagen ausmachen, ebenfalls ohne Ton- und Klangfarbe.

Genausowenig lässt sich der Begriff vor 1830 in den deutschen und philosophischen Literaturbeständen der digitalen Bibliothek nachweisen. Letztere bietet komfortable Suchfunktionalität aber keine Gewissheit. So kann der Nachweis bei Herder dort nicht gefunden werden, weil der betreffende Text (noch) nicht erfasst ist.

Im *Handbuch der Physiologischen Optik*, das parallel zur *Lehre von den Tonempfindungen* entstanden ist, gibt Helmholtz einen geschichtlichen Abriss über Farbe/Ton-Korrespondenzen. Seine Kritik an einer 1 : 1-Übertragung, an ihrer Willkürlichkeit, gleicht derjenigen von de Mairan [1737]. Helmholtz erwähnt de Mairans Kritik an Newton (mit Seitenangabe!), Helmholtz' Kenntnis dieses Textes ist ein starkes Indiz dafür, dass Helmholtz' Resonanztheorie des Hörens direkt auf de Mairan aufbaut.

Helmholtz' Rezeption und Verfeinerung von Youngs Farbrezeptorthese ist heute Standard der physiologischen Farbtheorie. Die geometrische Topologie der Farben gleicher Helligkeit in zwei Dimensionen ist aus Sicht ihrer Transponierbarkeit auf Klänge bedeutsam: So könnte die akustische Helligkeit im Sinne von Grey [1975], Leirdahl [1987] mit dem Zusammenwirkung zweier Zelltypen (rot und blau) verglichen werden, eine differenziertere Beurteilung der spektralen Zusammensetzung von Klängen in mehreren Dimensionen mit mehreren Zelltypen wie beispielsweise mittels rot-gün-blau für tief-mittel-hoch. Eine solche Übertragung ist vom Standpunkt der Physiologie nur eine metaphorische Veranschaulichung, wenn die Kontaktstellen Retina und Basilarmembran als Schnittflächen zur neuronalen Verarbeitung mit einander verglichen werden, denn es gibt nicht mehrere Typen von Schallrezeptoren. Eine allfällige höhere Zusammenfassung der spektralen Schallinformation in mehrere Frequenzonen ist, wenn man Schoutens Konzept der Perzepte oder dasjenige der kritischen Bänder zu Grunde legt, naheliegend und führt zum Vergleich des Hörvorgangs mit einer Filterbank aus Bandpassfiltern (zum Teil mit variablen Filterfrequenzen [Plomp 1976, Reuter 1995, 31]. Diese Bandpassfilter wären in Bezug auf ihre Frequenzselektivität mit den Farbrezeptoren zu vergleichen. [Vgl. Kap. 7.4.3, Kap. 8.4]

Ob sich aus derartigen Modellen eine konsistente höherdimensionale

Klangfarbenkartographierung ableiten liesse, sei dahingestellt [vgl. auch Kap. 7].

Bemerkenswert an Helmholtz' Auseinandersetzung mit dem Ton/Farbe-Problem ist, dass er nirgends einen Hinweis auf die Herkunft des jungen deutschen Kunstworts *Klangfarbe* gibt. Sein Hinweis auf die Physiker, welche die Klangfarbe auf die Schwingungsform zurückführen, könnte, wenn er auf Seebeck gemünzt sein sollte, ihn auf dessen Formulierung *Verschiedenheiten des Klangs* sensibilisiert haben [Kap. 4.1.3]. Es ist also anzunehmen, dass sich der Begriff in der musikalischen Fachsprache rasch etabliert hat. Brandt und Helmholtz sind meines Wissens die ersten, die ihn in einem mathematisch-naturwissenschaftlichen Kontext verwenden [vgl. Kap. 5.1]. Es ist aus den konsultierten Quellen nicht ersichtlich, ob Brandt, den Begriff von Helmholtz übernommen hat. Der Wortbestandteil *Klang* im Kompositum erklärt sich aus Kochs und Helmholtz' Unterscheidung in Ton für den einfachen Sinuston und Klang für aus einfachen Tönen zusammengesetzten Schall mit multiplen oder nahezu multiplen Frequenzverhältnissen.

Der Wortbestandteil *Farbe* könnte etymologisch vom synästhetischen Aspekt befreit werden, wenn die gemeinsame etymologische Wurzel *Farbe* und *Variabilität* berücksichtigt wird. Ein diesbezüglicher Hinweis wurde bislang in keiner Quelle des 19. Jahrhunderts gefunden.

4.1. Ton und Klang

Die Definition der Grundbegriffe Ton und Klang bei Chladni aus einer strikt physikalischen Sicht scheinen die Darstellbarkeit beliebiger Klänge als eindeutige Überlagerung von Sinustönen vorauszusetzen. Obschon Chladnis Studium der Eigenfrequenzen des klingenden Körpers eine spektrale Theorie voraussetzen, ist für ihn das Phänomen der Klangfarbe unerklärbar, denn sein *Ton-* und *Klangbegriff* schliesst eine Verschmelzung der Vielheit zu einer Einheit der Empfindung a priori aus. Klangfarbe auf Basis von Sinustönen, wäre für ihn eine Täuschung. Das Begriffspaar *Ton / Klang* bei Koch hingegen nimmt Helmholtz' Definitionen vorweg. Anderschs Wortgebrauch wird in Kap. 4.4.5 kurz vorgestellt. Er basiert auf Chladnis Begrifflichkeit und deckt sich mit der heutigen Sprechweise in Alltag und Musikwissenschaft, nicht aber mit derjenigen der Physik.

4.1.1. Chladni

Ernst Florens Friedrich Chladni, *Entdeckungen über die Theorie des Klanges*, Weidmanns Erben und Reich, Leipzig 1787, Leipzig : Zentralantiquariat der Deutschen Demokratischen Republik ; Bärenreiter-Verlag Kassel, 1980 [Chladni 1787]
Neue Beyträge zur Akustik, Breitkopf und Härtel, Leipzig 1817, Leipzig : Zentralantiquariat der Deutschen Demokratischen Republik ; Bärenreiter-Verlag Kassel, 1980 [Chladni 1817]

Es ist bekannt, daß bey dem *Grundtone* einer *Saite* die *Axe* nirgends durchschnitten wird, bey den übrigen Tönen aber, welche man harmonische Töne nennt, 1, 2, 3, und mehreremal; das auch wenn man den Grundton als 1 ansieht, die übrigen Töne in der Progression 2, 3, 4, u.s.w. stehen *). Jeder beliebige harmonische Ton einer Saite läßt sich leicht hervorbringen, wenn man eine Stelle, wo ein Schwingungsknoten ist, gelinde berührt, und zugleich die Mitte eines schwingenden Theils mit dem Violinbogen streicht, oder auf andere Art in Bewegung setzt. Es werden diese Töne vorzüglich auf der Trompete marine ausgeübt;

*) Eben so bekannt ist auch, daß Hörner, Trompeten und offene Pfeifen die nämliche Folge von Tönen geben, gedeckte Pfeifen aber die mit den ungeraden Zahlen übereinkommenden Töne. [Chladni 1787, 2-3]

Jeder klingende Körper kann verschiedene Töne geben, und nimmt bei jedem derselben eine andere Art der schwingenden Bewegung an; indem die dadurch verursachte Krümmung die *Axe*, d. i. die Gestalt des Körpers, wenn er in Ruhe ist, entweder gar nicht, oder in 1, 2, 3, und mehreren Stellen durchschneidet. Die Stellen, wo die schlangenförmigen Schwingungslinien die *Axe* durchschneiden, werden von Sauveur, de la Hire und anderen *Schwingungsknoten* genennt; sie bleiben in Ruhe, während daß die übrigen Theile des klingenden Körpers sich bewegen, und man kann an einer oder mehreren solchen Stellen den Körper berühren, oder Dämpfungen anbringen, ohne daß der Klang dadurch gehemmt wird, welches aber sogleich geschieht, wenn man eine Stelle zwischen zween Schwingungsknoten berührt, oder auf andere Art dämpft. [Chladni 1787, 2]

Die beiden vorangehenden Textstellen handeln ausschliesslich von den Bewegungsgesetzen des klingenden Körpers. Die korrespondierende Hörempfindung wird dabei nicht thematisiert. Chladni spricht nur von Tönen (Grundton, harmonische Töne) und denkt dabei

wohl an Sinusschwingungen. Insbesondere wird kein besonderes Augenmerk auf die mögliche Gleichzeitigkeit der Teiltöne gelegt. Die folgende Stelle thematisiert demgegenüber die Superposition und die Hörempfindungen und bringt dabei den Begriff Klang ins Spiel:

Hört man bey jedem Klange nur einen Ton, oder hört man allezeit mehrere zugleich? Daß ein klingender Körper zweyen oder mehrere, oder allenfalls auch alle Töne, die er einzeln zu geben im Stande ist, auch zu gleicher Zeit könne hören lassen, ist von Euler und Bernoulli hinlänglich erwiesen, es wird solches auch bey Anstellung der vielen bisher erwähnten Versuche öfters durch die Erfahrung bestätigt; daß man aber allezeit mehrere Töne zugleich höre, und eben dadurch ein Klang sich von einem bloßen Schalle oder Geräusche unterscheide, wird von vielen Schriftstellern ganz ohne Grund angenommen. So heißt es in Erxlebens Naturlehre: 'Ein in der Musik geübtes Ohr empfindet es deutlich, daß kein Klang so einfach ist, als es einem weniger geübten scheinen könnte, sondern daß in jedem Klange vielmehr alle Töne gewissermaßen mitklingen; [...] Die Reinigkeit eines Klanges und sein Unterschied von einem anderen Schalle oder Geräusche scheint also nicht sowohl darinnen zu bestehen, daß er ganz einfach und ungemischt ist, oder daß die Luft blos Schwingungen von einerley Geschwindigkeit dabey bekömmt, sondern daß vielmehr der eigentliche Grundton, und nach ihm die Consonanzen alle übrigen unangenehmen Töne überwiege; so wie auch unstreitig die Theilchen der Saite mit ganz verschiedenen Geschwindigkeiten zittern müssen, ungeachtet die Saite im Ganzen nur einerley Schwingung hat.' Der Verfasser der größtentheils vortrefflichen musikalischen Artikel in Sulzers allgemeinen Theorie der schönen Künste sagt unter dem Artikel *Klang*, daß man bey einem etwas tiefen Ton einer Saite allemal die harmonischen Töne mithöre, und setzt hinzu: 'Jeder Ton ist ein Accord, dadurch hört der Ton auf, ein bloßes Klappern zu sein.' Rameau und nachher Jamard haben fast alle Grundsätze der Harmonie daraus herzuleiten gesucht. Hr. Prof. Busse in Dessau ist gar nicht geneigt, ein Mitklingen höherer Töne anzunehmen, und gesteht, daß er bei den Tönen reiner Blasinstrumente, wie auch bei dem Anschlagen einer Saite nur einen einfachen Ton zu hören im Stande sey, wenn 1) alle übrigen Saiten des nämlichen Instruments gehörig gedämpft sind, damit man nicht die resonierenden Consonanzen derselben mithöre, 2) wenn die Saite ganz rein, d. i. allethalben gleichartig und von gleicher Dicke ist, 3) wenn die Nebenschwingungen vermieden werden, welche etwa durch die Berührungsstelle verursacht werden könnten. [Chladni 1787, 65]

Der Hinweis auf Daniel Bernoulli und Euler bezieht sich auf das Superpositionsprinzip im klingenden Körper. Die Frage nach der Beschaffenheit des Einzeltons wird dabei von Chladni nicht gestellt. Oberflächlich betrachtet, scheint er Bernoullis Ansicht zu vertreten, wonach jeder Klang als Überlagerung von sinusförmigen Elementartönen dargestellt werden kann, zumindest widerspricht diese Auffassung nicht Chladnis Formulierung. Dass eine solche Überlagerung als mathematische Summe gedeutet werden kann und dass die Bausteine Sinusschwingungen sind, kommt allerdings nicht zum Ausdruck. Der generelle Hinweis auf die mathematischen Autoritäten Daniel Bernoulli und Euler, kaschiert die mathematische Theorielücke betreffend das Theorem von Fourier. Es bleibt offen, wieweit sich Chladni einer solchen Theorielücke überhaupt bewusst ist. Mit der Erkenntnis, dass neben rationalen auch irrationale Teiltonverhältnisse im gleichen klingenden Körper möglich sind, geht Chladni über Sauveur hinaus. Ansonsten ist er auf dem gleichen Stand.

Von besonderem Interesse ist aber seine Behandlung des Themas Einheit in der Vielheit, die er anhand von Zitaten aus zeitgenössischen Theoretikerquellen führt. Eine solche Einheit hält er nicht für gegeben, auch dann nicht, wenn die beteiligten Teiltöne ganzzahlige Vielfache einer Grundfrequenz sind.

Alle diese coexistirende Schwingungsarten sind aber nicht etwa als einziger Klang, oder als wesentliche Bestandtheile des Grundtones, wie einige behaupten, sondern als mehrere von dem Grundtone und von einander ganz verschiedene Klänge anzusehen, die an der nämlichen Saite zu gleicher Zeit, eben so, wie an mehreren Saiten, Statt finden können. Auch Blasinstrumente können mehrere Töne zu gleicher Zeit geben, die wenn das untere Ende offen ist, in Verhältnissen der natürlichen Reihe ganzer Zahlen stehen, wenn aber das untere Ende gedeckt ist, mit den ungeraden

Zahlen übereinkommen. [...] Die darinnen befindliche Luft, welche den klingenden Körper vorstellt, kann nämlich zwey oder mehrere Schwingungsarten zugleich annehmen, ohne daß eine der andern hinderlich ist. [Chladni 1787, 68-69]

Hier werden die Teiltöne zu Klängen erhoben. Jeder Teilton ist ein selbständiger Klang. Diese Klänge koexistieren in einer Saite oder einer Orgelpfeife. Die Begriffe Ton und Klang werden dabei weitgehend synonym verwendet. Chladnis Betrachtungsweise ist alles andere als wahrnehmungszentriert. Er scheint ein ungebrochenes Eins-zu-eins-Verhältnis zwischen dem physikalischen Ton und seiner Wahrnehmung vorauszusetzen.

4.1.2. Koch 1802

Heinrich Christoph Koch, *MUSIKALISCHES LEXIKON welches die theoretische und praktische Tonkunst, encyclopädisch bearbeitet, alle alten und neuen Kunstwörter erklärt, und die alten und neuen Instrumente beschrieben, enthält*, Frankfurt 1802, fotomech. Nachdruck, Georg Olms, Hildesheim 1964, Klang, 834–849 [Koch 1802]

Klang

So nennt man die Wirkung, die ein solcher Luftstrom auf unser Ohr macht, der aus gleichartigen Schwingungen der Lufttheile bestehet, welche von einem dichten elastischen Körper verursacht werden, und die so geschwind auf einander folgen, daß wir bey dem Anstoßen derselben an unsere Gehörnerven keinen Zwischenraum der Zeit wahrnehmen können. [...]

Alles was unser Ohr empfindet, ist Wirkung eines sich auf eine gewisse Art schwingenden Luftstromes, der unsere Gehörnerven trifft, und ihnen die Art seiner Schwingungen mittheilet;*) daher muß nothwendig die verschiedene Beschaffenheit dieser Schwingungen auch eine verschiedene Wirkung auf unser Ohr machen.

Es ist sehr begreiflich, daß die Beschaffenheit dieser Schwingungen lediglich von der Beschaffenheit des Körpers abhängen müsse, durch welchen sie hervorgebracht werden. [Koch 1802, 834]

Der Nebensatz „welche von einem dichten elastischen Körper verursacht werden“ verweist auf eine monokausale Perspektive, die einen schwingenden Körper als notwendige Bedingung für die Entstehung eines Klanges erachtet. Der Klang eines Blasinstruments, bei dem bei der Schallerzeugung die darin eingeschlossene Luftsäule schwingt und nicht das umschliessende Material, wird von Kochs Definition nicht erfasst, es sei denn Luft werde ähnlich wie bei Erleben auch als Körper angesehen. *Körper* entspricht dann in heutigem Sprachgebrauch *Materie*. Lässt man den Nebensatz in der Definition weg, bleibt die psychoakustische Komponente: Die gleichartigen Luftschwingungen können vom Gehör nicht in Einzelschwingungen aufgelöst werden, wenn sie genügend rasch aufeinander folgen. Dabei kann der Zwischenraum zwischen zwei Luftstößen nicht wahrgenommen werden, weil er zu kurz ist. Poissons Metapher des Kornfeldes [vgl. Kap. 2.1.6] passt gut zu Kochs Beschreibung der Trägheit des Gehörs: Der Hörnerv hat zu wenig Zeit, um sich zwischen zwei Stößen zu erholen. Die Gleichartigkeit der Einzelschwingungen, die Periodizität, ist die definierende Eigenschaft des Klanges. Hören ist Registrieren der Wirkung von Schwingungen in der Luft. Eine verschiedene Beschaffenheit der Luftschwingungen erzeugt eine verschiedene Wirkung auf das Gehör. Es scheint naheliegend, diese Beschaffenheit geometrisch als Gestalt der Schwingung zu deuten. Daraus folgt in der Sinusperspektive zwingend die Sensitivität für Phasenrelationen. Gleiche Teiltonamplituden hätten je nach Phasenbeziehungen immer eine verschiedene Wirkung, denn die Gestalt der Schwingung ist

davon abhängig. Weniger unvorsichtig wäre der umgekehrte Schluss von der Verschiedenheit der Wahrnehmung auf die Verschiedenheit der verursachenden Schwingungen.

Die hier nicht wiedergegebene Fussnote befasst sich mit der Frage, ob die Luft für die Schallausbreitung notwendig sei, und beschreibt den Vakuumversuch, bei dem man ein Glöckchen unter einer Glashaube während des Entziehens der Luft zwar schlagen sieht, aber nicht mehr hören kann. Das Medium Luft ist also für die Schallübertragung notwendig, verhält sich aber passiv, denn die Verschiedenartigkeit der Wirkung wird allein auf die Verschiedenartigkeit des klingenden Körpers zurückgeführt. Nicht explizit ausgeschlossen ist, dass verschieden geformte Körper gleichartige Schwingungen hervorbringen.

Koch behauptet folgende Implikationen:

verschiedene sonore Körper \leftarrow verschiedene Luftschwingungen \leftrightarrow verschiedene Wirkung.

Wie ist bei Koch Klang gegen Schall und Laut abzugrenzen?

Wenn man z.B. mit einem Hammer an ein Stück Blei schlägt, so entsteht zwar eine gewisse Bewegung der Luft, die eine Wirkung auf unser Ohr macht, welche man einen *Laut* oder *Schall* nennet. Einen wirklichen Klang kann aber dieser Körper nicht geben, weil er nicht im Stande ist, die erregte Bewegung der Luft einige Zeit fortdauernd zu erhalten, oder ihr eine bestimmte Art von Schwingungen mitzutheilen; denn seine Theile äussern nach dem erhaltenen Schlage kein Bestreben, in ihren vorigen Zustand zurück zu kehren, oder sie machen keine Bewegung, welche die Lufttheile in eine bestimmte Art von Schwingungen versetzen könnte. [Koch 1802, 836]

Eine sehr stark gedämpfte hörbare Schwingung ist kein Klang. Wesentlich für den Klang ist die Gleichartigkeit der Einzelschwingungen und seine Dauerhaftigkeit.

Bey dem Klange läßt sich demnach Höhe und Tiefe unterscheiden. Vergleichen wir nun mehrere Klänge in Ansehung ihrer Höhe und Tiefe, oder bringen wir sie in dieser Rücksicht in eine gewisse Art von Beziehung, so bezeichnet man alsdenn jeden besonderen Klang mit dem Worte *Ton*. [Koch 1802, 838]

Ein Ton ist ein Klang im Kontext von anderen Klängen. Dabei ist das unterscheidende Merkmal die Tonhöhe. Beim Ton wird von den von der Tonhöhe verschiedenen Merkmalen abstrahiert.

Die übrigen bemerkenswertesten Eigenschaften des Klanges sind folgende:

1) Der Klang kann für sich selbst betrachtet rein und unrein, rau und sanft, stark und schwach u.s.w. seyn.

Die Stärke und Schwäche desselben hängt, wie wir schon vorher gesehen haben, nicht von dem größeren oder kleineren Grade der Geschwindigkeit der Schwingungen sondern bloß von der Heftigkeit derselben, oder von der größeren oder kleineren Menge der sich schwingenden Lufttheile ab.

Die Reinheit des Klanges bestehet in dem Gleichartigen und in dem Unvermischten seiner Schwingungen. Folgen die Schwingungen nicht in völlig gleichen Zeiträumen auf einander, welches geschieht, wenn die Saite nicht von gleicher Stärke ist, oder sind mit dem bestimmten Grade der Geschwindigkeit der Schwingungen andere Schwingungen vermischt, die mit jenen in einem ganz widrigen Verhältnisse stehen, so nennt man die Modifikation des Klanges, die dadurch bewirkt wird, *unrein*. Der letzte Fall findet sich sehr oft bey Darmsaiten, wenn die verschieden Fäden [...] nicht egal zusammengedreht sind [...], wodurch ungleiche oder vermischte Schwingungen erzeugt werden. So hängt nun ebenfalls das Rauhe oder Sanfte des Klanges von der Beschaffenheit des sonoren Körpers ab. Ein klingender Körper der wenig scharfe Ecken und Biegungen hat, und dessen Material glatt

gearbeitet ist u. d. gl. bringt gewöhnlich einen sanfteren Ton hervor, als ein Körper von gerade entgegengesetzter Beschaffenheit. [Koch 1802, 841-842]

Die Formulierung zur Charakterisierung der Lautstärke, die nur „von der Heftigkeit derselben, oder von der größeren oder kleineren Menge der sich schwingenden Lufttheile“ abhängt, lässt je nach Interpretation des „oder“ zwei Lesarten zu: Handelt es sich um zwei alternative Erklärungen oder bloss um die Erklärung der Heftigkeit durch das korrespondierende Verhalten der „Lufttheile“. Im ersten Fall könnte die Heftigkeit auch als Auslenkung, das heisst Weite der Schwingung gedeutet werden. Aber die Lautstärke könnte auch durch die Zahl der in Schwingung versetzten Teilchen bedingt sein. Je nach Lautstärke werden mehr oder weniger Luftteilchen in „Resonanz“ versetzt. Im zweiten Fall ist die Heftigkeit äquivalent zu einer grossen Zahl schwingender Luftpartikel. Die Stelle zeigt wie wenig über die Luft und ihre unsichtbaren Schwingungen allgemein bekannt ist.

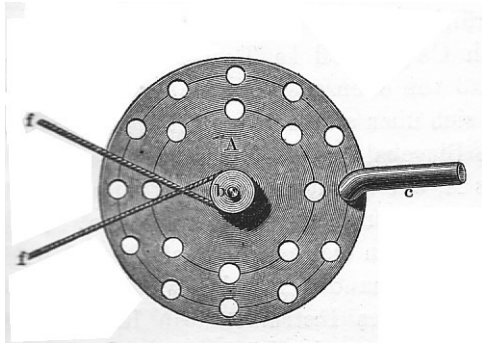
Die Reinheit beziehungsweise Unreinheit läuft auf die Unterscheidung von Ton und Geräusch hinaus. Auch hier bietet Koch zwei Erklärungen: Abweichung von der Isochronizität oder Überlagerung mehrerer Töne mit unverträglichem Frequenzverhältnis ergeben einen unreinen Klang.

Die am Schluss genannte direkte Korrespondenz für das Adjektivpaar *rauh/sanft* zwischen der Oberflächenbeschaffenheit und der Klangqualität erinnert an Mersenne. Koch gibt dazu keine Charakterisierung auf dem Niveau der zugehörigen Schwingungen.

4.1.3. Ohm/Seebeck: Impulsschwingungen und trigonometrische Reihen

Die Auseinandersetzung zwischen Ohm und Seebeck über die Definition des Tons spielt sich vor dem Hintergrund des erstmals auf die Akustik angewandten Theorems von Fourier ab [Ohm, 1843]. Während bei Young die Approximation der Dreiecksschwingung durch harmonisch überlagerte Sinusschwingungen (und umgekehrt der Sinusschwingung durch harmonisch überlagerte Dreiecksschwingungen) auf heuristischem Weg gefunden zu sein scheint, steht nun ein Rechenverfahren zur Verfügung, das es erlaubt, beliebige periodische Signalverläufe in eindeutiger Weise in ihre Sinusbestandteile zu zerlegen. Zur Bestimmung der Partialamplituden sind pro Sinusbestandteil zwei Integrationen erforderlich, eine Aufgabe, die in einfachen Fällen formelmässig exakt (und sonst iterativ mit beliebiger Genauigkeit) gelöst werden kann.

Streitobjekt zwischen Ohm und Seebeck sind die von Lochsirenen hervorgebrachten Töne. Eine Lochsirene besteht aus einer sich drehenden Scheibe mit auf einem Kreis um die Drehachse angeordneten Löchern. Aus einer sich über dem Löcherkreis befindlichen Düse strömt vertikal zur Scheibe ein konstanter Luftstrom. Dadurch entsteht, wenn sich die Löcher auf den Punkten einer regulären Kreisteilung befinden, ein periodisches Schallsignal, dessen Frequenz sich aus der Drehgeschwindigkeit der Scheibe und der Zahl der Löcher berechnen lässt. Seebeck nahm an, dass die Signalgestalt eines Sirenentons eine periodische Folge von Impulsen darstellt und dass periodische Impulse eine Tonhöhenempfindung hervorrufen können.



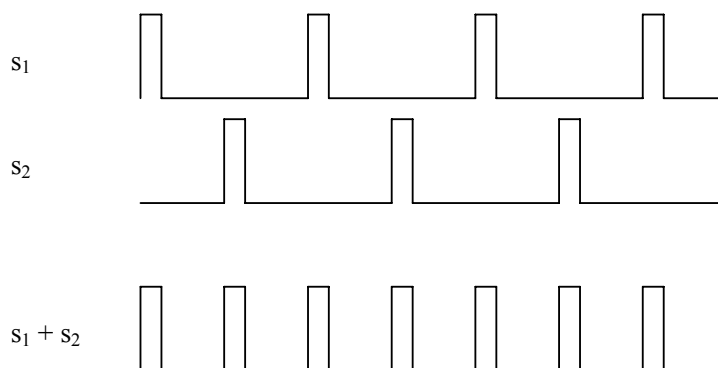
Die gezeichnete schnurgetriebene Lochsirene hat zwei Löcherreihen [Quelle: Helmholtz 1863, 21]. Eine zweite Düse über der inneren Löcherreihe erzeugt bei gleicher Drehgeschwindigkeit einen um eine Quinte tieferen Ton. Bei der Sirene nach Cagniard Latour hingegen versetzt der Luftstrom, der die Töne erzeugt, zugleich auch die Scheibe in Rotation. Diese gibt einen stärkeren Ton und sie verfügt über ein Zählwerk zur Ermittlung der Drehgeschwindigkeit [Helmholtz 1863, 25].

Seebeck 1841

August Seebeck, *Beobachtungen über einige Bedingungen der Entstehung von Tönen*, Poggendorf's Annalen der Physik und Chemie, Band LIII 1841, 417–436

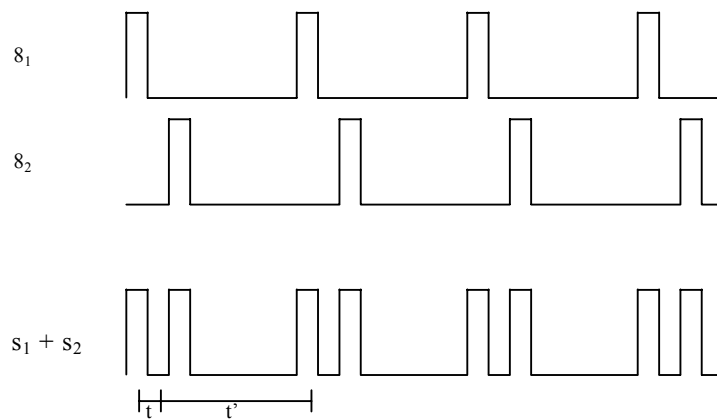
Dieser Aufsatz, der die Auseinandersetzung mit Ohm eröffnet, verwendet noch keine trigonometrische Reihen. Seebeck vergleicht zwar periodische Impulsfunktionen mit Sinusfunktionen und verweist auf das unterschiedliche Interferenzverhalten von Einklängen, begründet dies aber im Falle der Impulsfunktionen direkt anhand der Signalgestalt, ohne auf die Fourierzerlegung zurückzugreifen zu müssen. Schon in diesem Aufsatz vermutet er auch einen Zusammenhang zwischen der Schwingungsform und den „Verschiedenheiten des Klanges“.

Durch Überlagerung zweier identischer periodischer Impulsfunktionen, deren Impulsbreite weniger als eine halbe Periode beträgt und die zeitlich um eine halbe Periode versetzt sind, entsteht eine Impulsfunktion der doppelten Frequenz. Durch Überlagerung zweier gleicher Sirenentöne kann also ein Ton der Oktave erzeugt werden. [Seebeck 1841, 433–434]



Dies kann durch zwei auf dem Löcherkreis um den halben Löcherabstand versetzte Düsen oder durch auf konzentrischen Kreisen befindliche gegeneinander versetzte Löcherreihen realisiert werden.

Beträgt die zeitliche Versetzung der beiden Ausgangstöne wesentlich weniger als eine halbe Periode, wird dagegen die Oktave nicht gehört, denn die Periodizität des Summensignals ist die gleiche, wie diejenige der Primärtöne:



In diesem zweiten Fall ändert die Superposition nichts an der Tonhöhe. Seebeck schreibt dazu:

In der That ist es dieser Ton, den man unter solchen Umständen jederzeit hört. Ich muß jedoch zur Vervollständigkeit dieses Satzes hinzufügen, daß man außerdem auch noch einen andern, höheren Ton wahrnehmen kann. Wenn nämlich erstens t und t' [siehe Abbildung, dm] nicht zu sehr verschieden von einander sind, so hört man zugleich einen Ton von der Schwingungsdauer $\frac{t+t'}{2}$, also die höhere

Octave des ersteren. Man beobachtet dieß sehr leicht, wenn man der Sirene ein System von Löchern mit abwechselnd größeren und kleineren Zwischenräumen giebt, wie das nachstehende



und dann mit einer Röhre bläst [...].

[...] Man hört in diesem Falle 1) einen Ton von der Höhe, als ob nur die eine Hälfte der Löcher [...] vorhanden wären, und 2) [...] auch den Ton, als ob die Löcher [...] auf der Mitte [...] ständen. Je geringer der Unterschied der beiderlei Abstände ab und ba' ist, desto deutlicher wird der letztere und desto schwächer der erstere. [Seebeck 1841, 421]

Und er zieht daraus folgenden Schluss zur Tonhöhenenerkennung:

Man sieht aus diesen Versuchen, daß das Gehörorgan einerseits die Fähigkeit besitzt, ein System von Impulsen [...] in zwei oder drei Systeme von isochronen Impulsen zu zerlegen, z.B. das System a, b, a', b', a'', b'' etc. der obigen Figur in die Systeme a, a', a'' etc. und b, b', b'' etc; daß es aber andererseits auch durch einen nur einigermaßen angenäherten Isochronismus den Eindruck einer bestimmten Tonhöhe empfängt, wie von vollkommenem Isochronismus. [Seebeck 1841, 423]

Bei Sinusschwingungen kann ein solcher Effekt nicht auftreten, weil die Überlagerung zweier Sinusschwingungen der gleichen Frequenz wiederum eine Sinusschwingung der gleichen Frequenz ergibt [Seebeck 1841, 431–432]. Die Amplitude der Resultierenden ist dabei abhängig von der gegenseitigen Phasenlage, bei 180° Phasenunterschied und gleicher Amplitude ergibt sich Auslöschung, d.h. die Eingangssignale heben sich gegenseitig auf und es kann gar nichts gehört werden [vgl. Kap. [1.3.2](#)].

Die Zerlegung des zusammengesetzten Signals in mehrere „Systeme von isochronen Impulsen“ impliziert die Fähigkeit des Gehörs, mehrere simultane Sirenentöne im Einklang auseinanderzuhalten. Die Überlagerung zweier gleichfrequenter Sinusschwingungen erlaubt nachträglich keine solche Zerlegung, da sie aus dem obgenannten Grund zu einem „neuen“ Sinuston verschmolzen sind.

Über die Bedeutung der Sinusschwingungen für die Tonempfindung schreibt Seebeck:

Zwar muß man annehmen, daß die Wellen auch bei der Tonerregung durch stehende Schwingungen mehr oder weniger von dieser Form abweichen, weil die Verschiedenheiten des Klanges nicht wohl eine andere Ursache haben können; [Seebeck 1841, 434–435]

Die Verschiedenheiten des Klanges werden als Folge der Schwingungsform gedeutet. Dadurch, dass die Bewegung von der Sinusgestalt abweichen kann und noch immer nur ein einziger Ton empfunden wird, ist es möglich, dass Töne gleicher Tonhöhe und Lautstärke verschieden klingen.

Ohm 1843

Georg Simon Ohm, *Ueber die Definition des Tones, nebst daran geknüpfter Theorie der Sirene und ähnlicher tonbildender Vorrichtungen*, Poggendorfs Annalen der Physik und Chemie, Bd. 59, 1843, 513–565

Anlässlich seiner wiederholten Beschäftigung mit den Phänomenen der „Combinationstöne und Stöße“ seien Ohm Zweifel in Bezug auf die Natur der Töne gekommen:

Ich hatte nämlich dabei stets als ausgemachte Sache vorausgesetzt, daß die Bestandtheile eines Tones, dessen Schwingungsmenge m seyn soll, die Form $a \cdot \sin 2\pi mt$ oder $a \cdot \cos 2\pi mt$ einhalten müssen, worin t die Zeit und a die Schwingungsweite für die aufeinanderfolgenden Tonelemente bezeichnen, und umgekehrt, daß eine Succession von Eindrücken auf unser Ohr, welche ununterbrochen die hier aufgestellte Form einhält, auch nothwendig die Empfindung eines Tons bewirken müsse. [Ohm 1843, 497]

Ohm zitiert Röber mit Bezug auf Versuche von Charles Cagniard de Latour (1777-1859, Lochsirene 1819) und Felix Savart (1791-1841, Zahnradsirene 1820):

„[...] daß die Erzeugung des Tones nur durch die regelmäßige Wiederkehr irgend eines auf das Gehör einwirkenden Impulses bedingt wurde, wobei in allen Fällen dieselbe Abhängigkeit der Höhe des Tones von der Zahl der in einer Secunde erfolgenden Impulse statt findet. [...] daß die Entfernung der Maxima eines Binomiums [aus Verdichtung und Verdünnung, dm] keineswegs abhängt von der Dauer der einzelnen Impulse [...] wonach also die gewöhnliche Erzeugung musikalischer Töne, wo die verschiedenen Maxima der Verdichtung und Verdünnung alle in gleichen Zeitintervallen einander folgen, nur als ein besonderer Fall der allgemeinen Wiederholung eines aus Verdichtung und Verdünnung zusammengesetzten Impulses betrachtet werden muß“ (Röber, Repertorium der Physik Bd. 3, 30) [Ohm 1843, 513–514]

„Erst nachdem ich die vorige Darstellung abgegeben, lernte ich die genannte Abhandlung Seebeck's kennen [...] in welcher [...] das Wesen des Tones als die regelmäßige Wiederkehr irgend eines Impulses erklärt, und nachgewiesen wird, daß die sachgemäße Bezeichnung der Höhe eines Tones in der Angabe der Zahl der wiederholten einfachen oder zusammengesetzten Impulse; nicht aber in der gewöhnlichen Angabe der Verdichtungen und Verdünnungen bestehe“ (Röber, Repertorium der Physik Bd. 3, 53) [Ohm 1843, 514]

Und er interpretiert diese Auffassung als neues Paradigma des Tons:

Durch die eben mitgetheilten [...] Aeüßerungen sachverständiger Männer über das eigentliche Element des Tones scheint alles früher in dieser Hinsicht festgesetzte umgestoßen zu werden, ohne daß etwas Anderes mit Zuverlässigkeit dafür hingestellt worden wäre. Es kam mir vor als forderten sie zu einer neuen Definition des Tone auf; indessen der alten Regel eingedenk, daß zur Erklärung einer Naturgegebenheit keine anderen Ursachen anzunehmen seyen, als welche nothwendig und hinreichend sind stellte ich den Versuch an, ob nicht die Definition des Tones, wie sie von unseren Vorfahren auf uns übergegangen ist, alles in sich enthalte, was zur vollständigen Erklärung der neuen Thatsachen nothwendig und hinreichend ist. [Ohm 1843, 517]

Die „alte Definition des Tones“ ist gemäss Ohm die folgende:

- a) Es müssen die zur Bildung eines Tones von der Schwingungsmenge m erforderlichen Eindrücke in Intervallen von der Länge $1/m$ hinter einander hergehen, und in jedem dieser Intervalle fortdauernd die Form $a \cdot \sin 2\pi(mt+p)$ entwededer ganz rein in sich tragen, oder diese Form muß wenigstens als ein reeller Bestandtheil aus jenen Eindrücken abgeschieden werden können.
- b) [...] es muß die Größe p in allen [Intervallen] stets einen und denselben Werth erhalten.
- c) Die Größe a muß dabei entweder stets positiv oder stets negativ bleiben [...]. [Ohm 1843, 518]

Die Signalgestalt muss nach a) in jeder Schwingungsperiode sinusförmig zur Grundfrequenz sein oder die Grundfrequenz als Fourierkomponente enthalten, denn so ist „reeller Bestandtheil“ zu verstehen:

Als Mittel der Beurtheilung, ob in einem gegebenen Eindruck die Form $a \cdot \sin 2\pi(mt+p)$ als reeller Bestandtheil enthalten sey oder nicht, gebrauche ich das durch seine vielfachen und wichtigen Anwendungen berühmt gewordene Theorem von Fourier [...]. [Ohm 1843, 519]

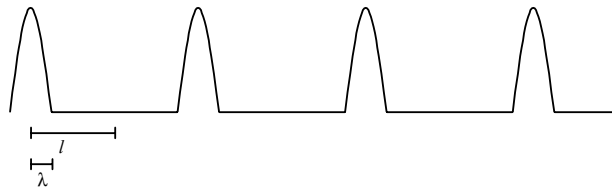
Nach b) darf sich die Phase p im Verlauf des Signal nicht ändern. Dies garantiert die Periodizität des Signalverlaufs. Einschränkend dazu schreibt er aber:

Es versteht sich übrigens von selbst [...], daß zur Wahrnehmbarkeit der Höhe eines Tones die Unveränderlichkeit des Werthes p nur in so viel aufeinander folgenden Tonwellen erfordert wird, als unser Gehörorgan zur Habhaftwerdung dieser Höhe verlangt. [Ohm 1843, 518-519]

Die Bedingung c) erlaubt das An- und Abschwellen eines Tons. Der Wert von a braucht nicht konstant zu sein. Ein Vorzeichenwechsel von a stört die Periodizität und die Stetigkeit.

Es stellt sich die Frage, wen Ohm als Vorfahren dieser Definition meinen könnte. Wo findet sich diese Gleichsetzung der gehörten Töne mit den Sinusschwingungen? Es geht dabei um das Gesetz des Schalldruckverlaufs, nicht um die Schwingungen der Schallquelle. Die Arbeiten von Taylor und Sauveur, beide 1712, beziehen sich nur auf die Möglichkeit der Sinusschwingung in einer idealen Saite und nicht auf den zum Ohr übertragenen Schall. Einzig bei Daniel Bernoulli ist uns eine solche Gleichsetzung explizit begegnet. Jedenfalls kann für das ganze 18. und das frühe 19. Jahrhundert nicht von einer allgemein akzeptierten Gleichsetzung von sinusförmigen Luftdruckschwankungen und Tönen die Rede sein. Dies insbesondere auch deshalb nicht, weil es auch keine einheitliche Vorstellungen über die Natur der Schallübertragung gab. Eher zu erwarten wäre ein solcher Ansatz im Zusammenhang mit Blasinstrumenten, wo die „Schallquelle“ selbst schon eine schwingende Luftsäule ist, wo also der Übergang vom klingenden Körper in die Luft wegfällt. Eine solche schwingende Luftsäule zu beobachten oder sichtbar zu machen, war in dieser Zeit nicht möglich.

Ohm berechnet die Fourierkomponenten einer periodischen Impulsfunktion und setzt dabei die Form der Impulse als gleichgerichtete halbe Sinusbögen voraus.



Der von Ohm angenommene Schwingungsverlauf zur Modellierung der Lochsirenentöne entspricht damit demjenigen von Eulers Gegenbeispiel gegen die Bernoullische Vermutung [vgl. Kap. 1.3 und 3.1.6]. Im Unterschied zur damaligen Auseinandersetzung ist es nun aber möglich, auch solche auf einem Stück konstante periodische Funktionen in Sinusbestandteile zu zerlegen. Dass eine solche Zerlegung möglich ist, widerspricht der naiven Anschauung, denn durch Superposition von Sinusschwingungen verschiedener Frequenzen mit nicht verschwindenden Amplituden ist schlecht einsehbar, dass sie sich auf einem ganzen Stück konstant zu 0 aufsummieren können. Bei der Fourierapproximation solcher Funktionen zeigt sich denn auch ein anomales Verhalten in unmittelbarer Umgebung der Unstetigkeits- oder Knickstellen [vgl. Kap. 8.1].

In Verallgemeinerung zu Ohms Rechnungen machte Seebeck später Aussagen über die Koeffizienten für eine sehr allgemeine Klasse von periodischen Impulsfunktionen [Seebeck 1844b].

Es geht Ohm dabei darum nachzuweisen, dass in einem solchen Signal die Grundschiwingung (als nicht verschwindende) Sinuskomponente vorkommt. Die Partialamplituden a_i verhalten sich gemäss seiner Rechnung wie $\frac{\lambda \cdot l}{l^2 - 4\lambda^2 \cdot i^2} \cdot \cos(\pi \cdot \frac{\lambda \cdot i}{l})$, dabei bedeuten l die halbe Periode der Schwingung und λ die halbe Impulsdauer [Ohm 1843, 524]. Daraus ergibt sich $a_1 \neq 0$ falls $l \neq 2\lambda$. Die Grundschiwingung ist aber, falls λ klein im Verhältnis zu l ist, nicht immer dominierend [Seebeck 1844 b, 371]. Die a_i sind bei kurzen Impulsen näherungsweise $\frac{\lambda}{l} \cdot \cos(\pi \cdot \frac{\lambda \cdot i}{l})$, das heisst sie nehmen wegen des Cosinusters mit zunehmendem i zyklisch ab und wieder zu.

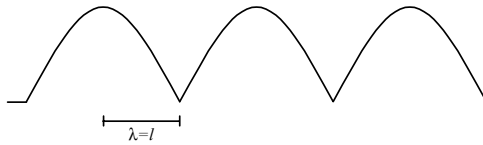
Für den Spezialfall $\lambda = l$, das heisst für eine gleichgerichtete Sinusschwingung, bei der die Impulse die ganze Periode ausfüllen, erhält Ohm aufgrund einer falschen Umformung für die Schwingungsweiten einen Ausdruck der Form $\frac{\dots}{\pi(i^2 - 1)}$ statt $\frac{\dots}{\pi(4i^2 - 1)}$. Somit ist für die

Grundschiwingung $i = 1$ die Amplitude nicht beschränkt (Division durch Null). Mit den korrekten Koeffizienten wird der Nenner dagegen nie Null. Ohm schreibt in diesem Zusammenhang:

d) Ist die Länge der gleichweit von einander abstehenden gleichartigen Eindrücke gleich der ganzen Länge des Intervalls, so nimmt die Stärke der Töne mit ihrer Höhe rasch ab und der tiefste überschreitet die höheren ganz und gar.

Diese letztere Bedingung trägt ohne Zweifel eine physische Unmöglichkeit in sich, wenigstens bei der hier angenommenen Form der Eindrücke, allein als Grenzbestimmung kann man nichts desto weniger dem Satze *d.* noch eine allgemeine Gültigkeit beilegen. [Ohm 1843, 558-559]

Die angesprochene „physische Unmöglichkeit“ könnte sich auf die Knickstelle, an der benachbarte Impulse zusammentreffen, beziehen.



Ohm nimmt vermutlich an, dass sich daraus die unendlich grosse Amplitude der Grundschwingung ergibt. Es liegt allerdings auch eine analoge „physische Unmöglichkeit“ für die Übergänge in die Nullage bei $\lambda < l$ vor, denn auch dies sind Knickstellen, das heisst Sprungstellung in der Ableitung.

Die Stärke verschiedener Sinustöne verhalten sich nach Ohm wie die Produkte von Amplitude und Frequenz [Ohm 1843, 558 Fussnote], das heisst bei zwei Tönen im Oktavabstand mit gleichen Amplituden ist der höhere Ton doppelt so laut wie der tiefere. Im obigen Fall nehmen die Amplituden – für die falschen ebenso wie für die korrekten

Koeffizienten – für grosse i wie $\frac{1}{i^2}$ ab, das heisst die Stärken nach Ohm verhalten sich wie $\frac{1}{i}$.

Die Intensität von Sinusschwingungen gemessen in Watt/m² (als quadratisches Mittel der Auslenkung) ist nicht frequenzabhängig. Allerdings ist die Lautheitsempfindung von Sinustönen gleicher Amplitude auch nicht frequenzunabhängig, wie der komplizierte Verlauf der Kurven Gleicher Lautheit (Isophone) belegt [vgl. Pierce 1989, 97-105 für eine anschauliche Darstellung dieser Sachverhalte und Kap. 5.8].

Da nun bei Seebeck die Obertöne nicht wesentlich in Erscheinung treten, schliesst Ohm aus seinem falschen Ergebnis und seinen Annahmen über die Lautstärke, dass die von Seebeck angenommene Form periodischer kurzer Impulse für die Lochsirene nicht mit der Wirklichkeit übereinstimmt, denn in allen andern Fällen ergeben sich bei zunehmender Ordnungszahl i keine derart schnell abnehmende Teiltonstärken:

Folglich [...] haben die in Seebeck's Versuchen, aus jedem einzelnen Loche hervorgegangenen Eindrücke eine Zeit angedauert, welche dem ganzen Intervalle von einem Loch zum andern entweder völlig, oder doch wenigstens sehr nahe gleich kommt. So befremdend diese Folgerung auch beim ersten Blick erscheint, da die Durchmesser der Löcher in Seebeck's Scheiben nicht oft über 1/10 von ihrem gegenseitigen Abstände betragen haben können, so natürlich wird sie bei näherer Ueberlegung. In der That ist nicht wohl anzunehmen, daß durchaus keine Einwirkung mehr auf das Loch vorhanden sey, so wie die Mündung der anblasenden Röhre an dem Loche vorüber und hinter die Scheibe getreten ist, da sie doch selbst an dieser Stelle noch eine Luftbewegung bewirkt, deren Einfluß sich zweifelsohne bis zu dem Loche hin erstrecken wird. [Ohm 1843, 564–565]

Ohms falsche Umformung im obigen Spezialfall $\lambda = l$ wurde von Seebeck bemerkt und, da Ohms Schlussfolgerung über die Schwingungsgestalt der Sirenentöne auf der starken Dominanz des Grundtons in diesem Spezialfall beruht, nicht zu Unrecht hervorgehoben:

Dann wird aber der erste Ton nicht unendlich Mal stärker, als die Beitäne sondern es verhalten sich die Schwingungsweiten der Töne $\frac{1}{2l}, \frac{2}{2l}, \frac{3}{2l} \dots$ wie die Zahlen $\frac{1}{3}, \frac{1}{15}, \frac{1}{35}, \dots$ [Seebeck 1843, 455-456]

Seebeck 1843

August Seebeck, *Ueber die Sirene*, Poggendorf's Annalen der Physik und Chemie, Band LX 1843, 449–481

Aus der Inkongruenz zwischen den berechneten Amplitudenverhältnissen und den wahrgenommenen Teiltonstärken bei den Sirenentönen nimmt Seebeck an, dass die von Ohm behauptete 1 : 1-Korrespondenz zwischen wahrgenommenen Tönen und Sinusschwingungen nicht zutreffen könne:

Ich ziehe aus den zuletzt berührten Erfahrungen den Schluß, daß die Stärke der Töne $\frac{1}{2l}, \frac{2}{2l}, \frac{3}{2l} \dots$ nicht bloß von der Größe der bezüglichen Factoren $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3 \dots$ abhängig ist; da aber weder A_0 , noch die Werte der θ , noch das Vorzeichen der α hieran einen Antheil haben können, so glaube ich annehmen zu müssen, daß jeder dieser Töne nicht bloß durch das *e i n e* seiner Periode entsprechende Glied gebildet wird. [Seebeck 1843, 472-473]

Zur Begründung dieser Vermutung betrachtet er allgemeine periodische Funktionen, bei denen der erste oder die ersten paar Teiltöne fehlen, und wirft die Frage auf, ob diese einer Tonhöhenempfindung, die ihrer Periodizität entspricht, hervorrufen können:

Man bezeichne durch $f(t)$ eine Anzahl Glieder der Gleichung (A), nämlich die Glieder vom s^{ten} an, so daß:

$$f(t) = \alpha_s \cos \pi \frac{st - \theta_s}{l} + \alpha_{s+1} \cos \pi \frac{(s+1)t - \theta_{s+1}}{l} + \alpha_{s+2} \cos \pi \frac{(s+2)t - \theta_{s+2}}{l} + \dots \quad (a)$$

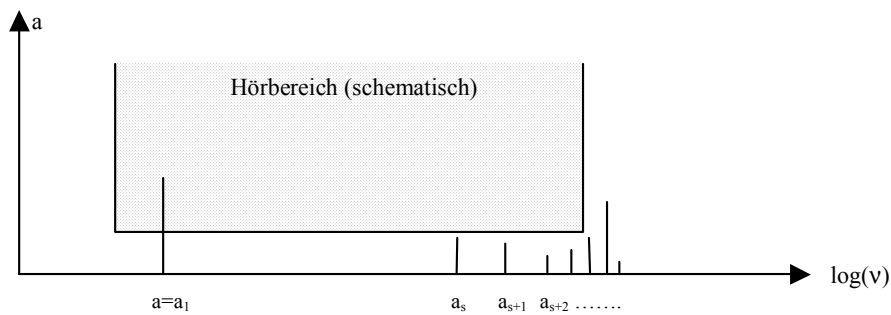
und denke sich zunächst, die durch $f(t)$ vorgestellte Bewegung werde unabhängig von den vorausgehenden Gliedern der Gleichung (A) hervorgebracht. Es ist sehr wohl denkbar, daß von den Gliedern der Gleichung (a) *einzelnen* keines eine merkbare Wirkung auf das Gehörorgan hervorzubringen vermag, während sie doch *zusammengenommen* stark genug sind, um eine solche zu erzeugen. Wenn namentlich unter s eine hinreichend große Zahl gedacht wird, so können die Töne $\frac{s}{2l}, \frac{s+1}{2l}, \frac{s+2}{2l} \dots$

unmerkbar bleiben, theils weil sie bereits die Gränze der Hörbarkeit nach der Höhe übersteigen können, theils auch wohl weil das Ohr unter den vielen einander nahe liegenden Tönen keinen einzelnen zu unterscheiden vermag, indem zugleich die einzelnen α äußerst klein gedacht werden können. Dessen ungeachtet könne diese Glieder als Gesamtwirkung eine beträchtliche Bewegung hervorbringen, und es ist nicht wahrscheinlich, daß diese ganz ohne Wirkung auf das Gehör bleibe. Da aber, wie man sogleich sieht, $f(t)$ periodisch denselben Wert wieder annimmt, so oft t um $2l$ vermehrt wird, so hat

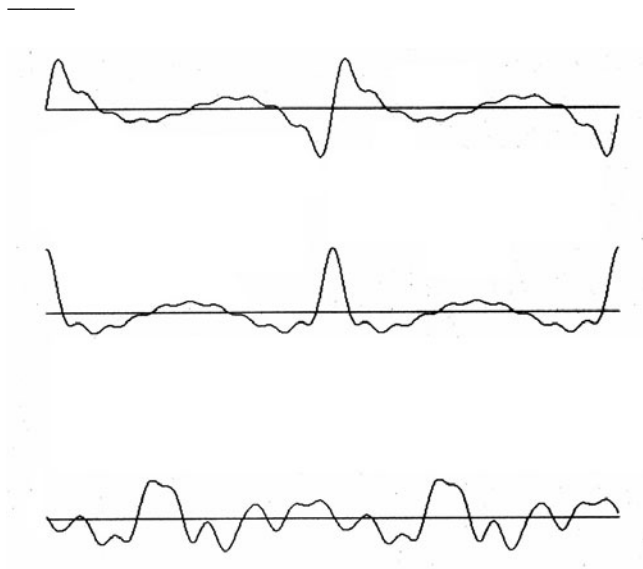
$f(t)$ dieselbe Länge der Periode, wie oben das Glied $\alpha_1 \cos \pi \frac{t - \theta_1}{l}$, das den Ton $\frac{1}{2l}$ gab. Es läßt sich

daher vermuthen, daß $f(t)$ denselben Ton $\frac{1}{2l}$ erzeugt, nur wahrscheinlich mit einer Verschiedenheit im Klange. [Seebeck 1843, 473-474]

Die Frage ist also diejenige nach der Möglichkeit von Periodiktönen. Das Bemerkenswerte an Seebecks Argumentation ist die Verwendung von unhörbaren Teiltönen, Sinusschwingungen deren Frequenz entweder im Ultraschallbereich liegt oder deren Pegel unterhalb die Hörschwelle fällt. Ebenso ein zweites Mal der Hinweis auf einen Zusammenhang zwischen Schwingungsform und Klangfarbe.



Seebeck nimmt an, dass sich Teiltöne je unterhalb der Hörschwelle zu einem Periodikton aufsummieren können. Desgleichen für Ultraschall. Letzteres scheint durch die Angaben von Ritsma [1962] widerlegt.



Zeitfunktionen für Signale mit fehlender Grundfrequenzkomponente. Die drei Funktionen gehören zu identischem Amplitudenspektrum aus den Teiltönen 2 bis 9. Die Teiltonamplituden verhalten sich wie $1/n$. Die erste Funktion enthält nur Sinuskomponenten (Punktssymmetrie), die zweite nur Cosinuskomponenten (Achsensymmetrie) und im dritten sind die Phasen gleichmässig verteilt. In den oberen beiden Signalen ist die fehlende Grundfrequenzkomponente als „Negativbild“ noch erkennbar. Das dritte Beispiel hat mehr und ungleichmässig verteilte Nulldurchgänge pro Periode und weniger deutlich ausgeprägte Maxima, dementsprechend wird die Periodizität – von Auge – weniger leicht erfasst

Ohm 1844

Georg Simon Ohm, *Noch ein Paar Worte über die Definition des Tones*, Poggendorf's Annalen der Physik und Chemie, Band LXII, 1844, 1–18

Außerdem bringt Seebeck in dieser Abhandlung mehrere Ausstellungen an meiner Behandlung des Gegenstandes, und [...] mehrere neue, factische Beweise, die gegen die Zulässigkeit der alten Ansicht von dem eigentlichen Element des Tones gerichtet zu seyn scheinen [...] [Ohm 1844, 3-4]

Insbesondere kommt Ohm auf den von Seebeck festgestellten Rechenfehler zu sprechen:

[...] da anstatt $\frac{4\alpha}{\pi(i^2-1)}$ stehen müsse $\frac{4\alpha}{\pi(4i^2-1)}$, und demgemäß das Verhältniß der Schwingungsweiten der aufeinanderfolgenden harmonischen Töne durch die Zahlen

$$\frac{1}{3}, \frac{1}{15}, \frac{1}{35}, \dots$$

dargestellt werden müße, während die falsche Angabe dafür die Zahlen

$$\frac{1}{\infty}, \frac{1}{3}, \frac{1}{8}, \dots$$

liefere. [Ohm 1844, 4-5]

Ohm begeht hier einen weiteren beschönigenden Fehler in den „falschen Angaben“, die sich so bei Seebeck nicht finden [Seebeck 1843, 455-456]. Das Hauptproblem war die Amplitude des ersten Teiltons ($i = 1$) die im Ausdruck $\frac{1}{i^2-1}$ eingesetzt $\frac{1}{0} = \infty$ und nicht $\frac{1}{\infty} = 0$ ergibt.

Dadurch wäre die Grundfrequenzkomponente im Falle der gleichgerichteten Sinusschwingung überhaupt nicht vorhanden, ganz im Unterschied zu Ohms ursprünglichen Behauptung.

Ohm scheint sich nur noch für das Amplitudenverhältnis zwischen dem zweiten und dritten Partialton zu interessieren:

[...] das Verhältniß der Schwingungsweiten von der Octave zur Duodezime die Zahlen 8 und 3 [...], während die verbesserte Leseart dafür die Zahlen 35 und 15 liefert; diese beiden Verhältnisse aber sich so wenig von einander unterscheiden, daß sie zu keiner Aenderung der Rede Anlaß geben können. [Ohm 1844, 5]

Seebeck bemängelte aber wie bereits erwähnt die „unendlich Mal stärkere“ Amplitude des ersten Teiltons [Seebeck 1843, 455-456].

Seebeck 1844

August Seebeck, *Ueber die Definition des Tones*, Poggendorf's Annalen der Physik und Chemie, Band LXIII 1844, 353–368, [Seebeck 1844a]

August Seebeck, *Ueber die Erzeugung von Tönen durch getrennte Eindrücke, mit Beziehung auf die Definition des Tones*, Poggendorf's Annalen der Physik und Chemie, Band LXIII 1844, 368–380, [Seebeck 1844b]

Ohms Antwort von 1843 veranlasste Seebeck gleich zu zwei Artikeln in den Annalen für Physik und Chemie von 1844. Im zweiten gibt er Abschätzungen für die Partialamplituden im Falle von beliebigen periodischen Störungen bzw. Impulsen, die nicht die ganze Periode ausfüllen.

In noch nie dagewesener Klarheit stellt Seebeck die Frage nach dem Wesen des Tons vor dem Hintergrund des Theorems von Fourier:

Wird ein Ton, dessen Schwingungsmenge m ist, ausschließlich gebildet durch eine Bewegung von der Form $a \cos 2\pi(mt + \tau)$, oder ist diese nur als ein besonderer Fall einer allgemeineren Form anzusehen? Da diese allgemeinere Form, so viel wir wissen, bei einem Tone von ungeänderter Stärke der Bedingung genügt, daß nach Verlauf der Zeit $1/m$ stets derselbe Eindruck wiederkehre, so kann sie dargestellt werden durch die Reihe:

$$a_1 \cos 2\pi(mt + \tau_1) + a_2 \cos 2\pi(2mt + \tau_2) + a_3 \cos 2\pi(3mt + \tau_3) + \dots + a_0 \quad (A)$$

Jene Frage ist daher anders ausgedrückt, diese:

Hat an der Erzeugung des Tones m nur das erste Glied der Reihe (A) einen Antheil, oder können auch die folgenden Glieder zur Bildung dieses Tones beitragen? [Seebeck 1844a, 353]

Der Formelausdruck (A) wird von Seebeck auch die „weitere Form“ der Definition des Tons genannt.

In der Sprache der trigonometrischen Reihen ist die Frage somit die, ob das Verschwinden der Koeffizienten a_2, a_3, \dots für einen einheitlichen unzerlegbaren Toneindruck notwendig und hinreichend ist. Oder – umgekehrt formuliert – entspricht jeder trigonometrischen Reihe mit mindestens zwei Cosinusbestandteilen zwangsläufig auch eine mehrfache Tonempfindung?

Diese Fragestellung scheint eine statische Betrachtungsweise zu verraten: Entweder sind nicht heraushörbare Partialtöne möglich, dann ist die „weitere Form“ die adäquate oder vorhandene Teiltöne werden immer auch gehört, dann ist die enge Form die korrekte Auffassung.

Die Darstellung als trigonometrische Reihe ist gemäss Seebeck nicht zwingend die einfachste Darstellung eines periodischen Schallsignals, und nicht jede Koeffizientenkombination, das heisst jedes periodische Signal, führt zu einer einfachen Tonempfindung zur Grundfrequenz:

Dabei bemerke man, daß die weitere Form nur behufs der analytischen Behandlung in Gestalt einer Sinusreihe dargestellt ist, an sich aber eines einfacheren Audrucks fähig sein mag; ferner daß sie in Gestalt jener Reihe offenbar zu weit ist, so lange die Werte der a und τ ganz willkürlich gelassen werden [...]. [Seebeck 1844a, 354]

Seebeck gibt folgende Beispiele für periodische Schallsignale (gezeichnet sind jeweils eineinhalb Perioden):

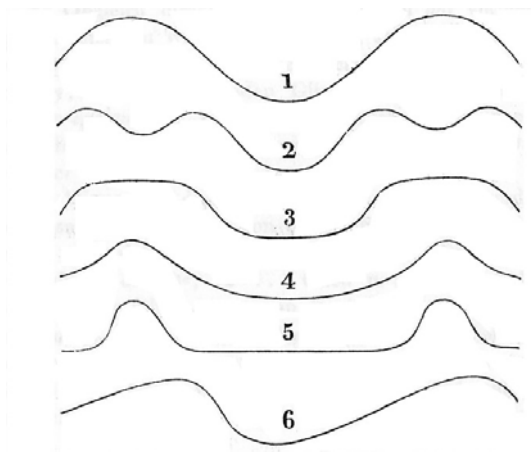


Fig. 1 – 6: [Seebeck 1844a, 354]

Anhand dieser Darstellung verschiedener Schwingungsformen zur gleichen Periode, formuliert Seebeck noch einmal die zentrale Frage:

[...] ob aber auch Formen, ähnlich den ziemlich willkürlich gezeichneten Figuren 3 bis 6, S. 354, stets außer dem Tone m dessen Beittöne $2m, 3m \dots$ hören lassen müssen, und zwar in der durch die entsprechenden Glieder der Reihe (A) bedingten Stärke, ist die Frage, um welche es sich handelt. [Seebeck 1844a, 355]

Zerlegt das Ohr jede periodische Schwingung in ihre Partialtöne, das heisst operiert es als verzerrungsfreier Fourieranalysator?

Für Beispiel 2 scheint ihm klar, dass die Grundfrequenz und ihre Oktave (in gleicher Stärke) gehört werden [355], diese Form ist auch von Auge leicht zerlegbar. Die Beispiele 2 bis 5 haben nur Cosinusanteile ($\tau_i = 0$ oder $=1$), Beispiel 6 hat nur Sinusanteile ($\tau_i = \pm \frac{1}{2}$), was sich aus den Symmetrieeigenschaften der Kurven ergibt. Beispiel 5 könnte dem Signalverlauf bei der Lochsirene entsprechen.

Denn es ist wohl einleuchtend, daß, sobald die sämtlichen Glieder der Reihe (A) durch die ihnen gemeinsame Periode an dem in dieser Periode enthaltenen Ton einen Antheil haben, ein entsprechendender Theil ihrer Mitwirkung verloren gehen muß für die den Theilperioden (dem zweiten, dritten ... Gliede) entsprechenden Töne. Wenn z. B. die geraden Glieder allein, ohne die ungeraden, vorhanden sind, so werden sie den Ton $2m$ in einer gewissen Stärke geben; treten aber die ungeraden hinzu, so können jene jetzt den vorigen Ton nicht mehr in der vorigen Stärke geben, im Fall sie jetzt zugleich mit den letzteren für den Ton m in Anspruch genommen sind. [...] Sollte man aber etwas Künstliches oder gar etwas "Geisterhaftes" darin finden, daß dasselbe Glied der Reihe (A) einmal so und einmal wieder anders wirkt, so erwäge man, daß die anscheinende Künstlichkeit wohl nur darin liegt, daß wir eine an sich vielleicht nach sehr einfachen Gesetzen normirte periodische Bewegung in eine Sinusreihe aufgelöst haben, und daß ja bei den Combinationstönen ein gleiches Verhältnis eintreten muß, wie einer unserer ersten Akustiker mit Recht bemerkt. [Seebeck 1844a, 359–360]

Hier wird mit Energierhaltung argumentiert. Falls gewisse Teiltöne zur Wirkung der Grundfrequenz oder eines Partialtons beitragen, werden sie nicht mehr für sich erfahren, dafür üben sie eine verstärkende Wirkung auf jene aus. Die Gesamtstärke entspricht der Summe der Teiltonstärken, und diese werden je nach Zahl der verschiedenen gleichzeitig gehörten Tönen zu Teilsummen zusammengefasst.

Die Fourier-Zerlegung ist ein mathematisches Verfahren, dessen Anwendbarkeit auf den Hörvorgang [Fussnote 360] erst erwiesen werden müsste.

Unser Ohr empfindet den Eindruck einer periodischen Bewegung als Ton; alle Glieder, welche an dieser Periode Theil nehmen, können (wenigstens unter geeigneten Umständen) zur Stärke des Tons beitragen. Ohm sagt: Nur *ein* Glied bildet eigentlich den Hauptton, aber unser Ohr täuscht sich, indem es seine Beitöne zu ihm herüberzieht, und ihn selbst dadurch für stärker hält. Allein ich entgegne: Wodurch kann über die Frage, was zu einem Ton gehöre, entschieden werden, als eben durch das Ohr? [Seebeck 1844a, 360–361]

Die Wahrnehmung genießt wie bei Aristoxenos absolute Priorität: Täuschung darf bei psychischen Phänomenen nicht geltend gemacht werden.

[...] die Frage, wie es komme, daß wir an unseren Instrumenten die Beitöne so wenig bemerken, habe ich mir längst zu Gunsten meiner Ansicht beantwortet. [Seebeck 1844a, 361]

Was aber besonders die Sirene betrifft, so wiederhole ich, daß wenn auch bei gleich abstehenden Löchern Beitöne gehört werden können, diese stets nur *äußerst* schwach sind, obgleich sich andererseits aus den Versuchen, wenn sie im Sinne der engeren Annahme ausgelegt werden, ergibt, daß die bezüglichen Faktoren a_2, a_3 keineswegs klein sind. Die Annahme einer Gehörstäuschung müßte dem zufolge so weit ausgedehnt werden, daß selbst ziemlich starke Beitöne nicht oder kaum als solche gehört werden können, sondern vom Ohre zum Grundtone gezogen werden (...). [Seebeck 1844a, 362]

Auslegung „im Sinne der engeren Annahme“: Ohms Fourier-Analyse für periodische Impulsfunktionen.

Die Annahme der engeren Form ist *nicht notwendig*:
(Angenähertes) Vorkommen von Sinustönen in der Wirklichkeit:

Allein daraus folgt nur, daß ein Ton von jener Form seyn *kann*, aber nicht daß *jeder* Ton derselben genügen *muß*. Warum sollten z. B. Wellen von der Form wie Fig. 3 bis 6, S. 354, nicht vielleicht ebenso gut, und frei von Beitönen, denselben Ton geben wie die erste Form. Mir ist kein Grund bekannt, der das Gegentheil bewiese, und so lange nicht gezeigt ist, daß bei jeder mit der engeren Definition (Fig. 1 S. 354) nicht übereinstimmenden Wellenform Beitöne vorhanden sind, kann ich nicht anerkennen, daß die Annahme dieser engeren Form nothwendig sey. [Seebeck 1844a, 363–364]

„Beitöne vorhanden“ heisst sie sind hörbar, isolierbar.

Die Annahme der engeren Form ist als Erklärungsgrundlage auch *nicht hinreichend*:

Ich halte die engere Form nicht für hinreichend, weil sie [...] keine Verschiedenheit des Klanges zuläßt. Denn in dem Werthe $a \cos 2\pi(mt + \tau)$ bestimmt m die Höhe, a die Stärke des Tones und τ ist offenbar für die Beschaffenheit desselben von keiner Bedeutung, also bleibt Nichts übrig, was eine Verschiedenheit des Klanges begründen könnte. Man müßte also, bei jener Annahme, alle diese Verschiedenheiten entweder der Beimischung von Geräuschen oder dem unvermerkten Mitklingen von Beitönen, kurz solchen Eindrücken, die nicht zum Ton selbst gehören, zuschreiben, was gewiß nicht für alle jene Unterschiede, namentlich für die der Vocale, ausreichend ist. Dieß führt darauf, daß zur Erklärung der Klangverschiedenheit noch eine veränderliche Größe, etwa ein Factor $\phi(t)$ in den Ausdruck der engeren Schwingungsform aufzunehmen ist. Ist dieser Factor periodisch, und ist seine Periode der von $a \cos 2\pi(mt + \tau)$ gleich oder ein aliquoter Theil davon, so würde dieß nichts anderes geben, als eben die weitere Form. Sollte aber jener Factor eine andere, längere oder gar incommensurable Periode haben können, so würde daraus folgen, daß selbst die weitere Definition noch zu enge ist; ein Fall, dessen Möglichkeit ich für jetzt weder behaupten noch bestreiten will. [Seebeck 1844a, 364]

Hieran knüpft sich noch ein Bedenken gegen die engere Form, denn diese drückt nur einen Ton von constanter Stärke aus, und läßt ein Anschwellen oder Verhallen nicht zu. [Seebeck 1844a, 365]

Seebeck berechnet die Fourierzerlegung eines Sinustons, dessen Stärke periodisch zu- und abnimmt. Falls die beiden Frequenzen (Trägerfrequenz m und Modulationsfrequenz n) in rationalem Verhältnis stehen, entsteht dabei ein periodisches Signal:

Dieß würde nach Ohm's Definition das Zusammenklingen der Töne m , $m+n$, $m-n$, $m+2n$, $m-2n$, $m+3n$, $m-3n$ etc. geben, lauter Töne von wenig verschiedener Höhe, die uns statt eines reinen Schwellen und Nachlassens der Tonstärke die entsetzlichste Dissonanz geben würden. [Seebeck 1844a, 366]

Als Summe von Sinustönen interpretiert ergibt sich ein Cluster von Sinustönen um die Mittelfrequenz m mit konstantem Frequenzabstand n (wenn die amplitudenmodulierende Welle nicht sinusförmig ist). Das Beispiel nimmt die Periodizitätsforderung absolut und könnte von Ohm zurückgewiesen werden, denn er fordert keine konstante Amplitude, sondern nur:

Die Größe a [die Amplitude] muß dabei entweder stets positiv oder stets negativ bleiben [...]. [Ohm 1843, 518]

Eine Fourieranalyse, die Ohms Definition Rechnung trägt, berechnet die Koeffizienten nur über eine oder einige wenige Schwingungsperioden und tut so, als wäre das Signal streng periodisch zur gerade aktuellen Schwingungsform. Dadurch verändert sich das Spektrum

während eines Tons und die Eindeutigkeit der Darstellung geht verloren. Analysiert man einen Sinuston mit einer von seiner Frequenz abweichenden sample-Frequenz, so erhält man ein Spektrum mit mehreren Teiltönen. Ein solcher Ansatz liegt den meisten Verfahren der computergestützten Spektralanalyse zu Grunde [vgl. Kap. 8].

[...] die weitere Definition hingegen, welche das Wesen des Tones in die periodische Wiederkehr eines gleichen oder ähnlichen Bewegungszustandes setzt, scheint den bekannten Erfahrungen zu genügen. Wie die Bewegung beschaffens seyn müsse, damit der Ton einfach (frei von Beutönen) sey, ist uns noch unbekannt, und es bildet das Letztere, meines Erachtens, die nächste und wichtigste Frage, welche sich an diese Discussion knüpft. [Seebeck 1844a, 368]

Ein Ton ist also *einfach* im Sinne von Seebeck, wenn in ihm keine Obertöne erkennbar sind. Die Definition geht damit von der Wahrnehmung und nicht von der mathematisch-physikalisch bestimmbaren Schwingungsgestalt aus. Damit sind grundsätzlich, wie in jedem psychoakustischen Ansatz, individuelle Unterschiede möglich.

Abschliessend ein Zitat Seebecks zur Klangfarbe:

Ich wiederhole hierbei, daß wenn ein solches Beiton gehört wird, er zu verschwinden pflegt, wenn man die Stellung des Ohrs verändert.- Der einzige Unterschied, der bei allen jenen Abänderungen bemerkt werden kann, bezieht sich auf den Klang, welcher bei getrennten Eindrücken mehr schnarrend, und bei solchen, welche ineinanderfließen, mehr pfeifenartig ist *)

*) Cagniard-Latour fand den Ton der Sirene mehr dem der Trompete, Oboe, Fagott, menschlichen Stimme ähnlich, je nachdem die Entfernung und der Durchmesser der Löcher in verschiedenem Verhältniß stehen. (Ann. De chim. Et phys. T. LVI) [Seebeck 1844b, 375]

Die Qualität wird also durch das Verhältnis von Impulsdauer zur Periodizität, ähnlich wie bei Euler definiert [vgl. Kap. 3.3.4].

4.2. Grenzen der Superposition

4.2.1. Thomas Young 1800: Superposition und Schwebungen

Die Gleichzeitigkeit mehrerer Töne in der Luft und am gleichen Ort ist noch immer ein Thema:

XI. *Of the Coalescence of musical Sounds.*

It is surprising that so great a mathematician as Dr. SMITH could have entertained for a moment, an idea that the vibrations constituting different sounds should be able to cross each other in all directions, without affecting the same individual particles of air by their joint forces: undoubtedly they cross, without disturbing other's progress; but this can be no otherwise effected than by each particle's partaking of both motions. If this assertion stood in need of any proof, it might be amply furnished by the phaenomena of beats, and

X1. *Ueber die Vereinigung musikalischer Töne.*

Es ist überraschend, dass ein so grosser Mathematiker wie Dr. Smith für einen Moment angenommen hat, dass die Vibrationen, die verschiedene Töne erzeugen, in der Lage sein sollten sich in beliebiger Richtung zu kreuzen, ohne die gleichen individuellen Luftteilchen durch ihre verbundenen Kräfte zu treffen: zweifellos kreuzen sie sich, ohne den Fortgang der andern zu stören; aber dies kann nicht anders geschehen, als wenn jedes Teilchen an beiden Bewegungen teilnimmt. Falls diese Behauptung

of the grave harmonics observed by ROMIEU and TARTINI; which M. DE LA GRANGE has already considered in the same point of view. [Thomas Young 1800, 130-131]

irgendwelchen Beweis bedarf, kann dieser völlig durch die Schwebungserscheinungen geliefert werden und durch die von Romieu und Tartini beobachteten tiefen Harmonischen, welche schon von Lagrange vom gleichen Standpunkt aus betrachtet wurden.

Eine Stelle zur Superposition im Übertragungsmedium konnte in Robert Smith „Harmonics, or the philosophy of musical sounds“ [Smith 1749] nicht gefunden werden. Smith scheint Young zufolge zeitweise einen ähnlichen Standpunkt vertreten zu haben wie de Mairan. Der Nachweis für die physikalische Überlagerung (Addition) auf den Luftpartikeln wird über die Wahrnehmung geführt, die bei Schwebungen ein An- und Abschwellen eines einzigen Tons – entsprechend der Summenfunktion der Komponenten – registriert. Da nur ein Ton gehört wird, sind gemäss Young nicht verschiedene Partikel als Träger verschiedener Frequenzen beteiligt, sondern alle Partikel führen je eine kombinierte Schwingung aus. Das Argument ist nicht völlig stichhaltig. Young operiert hier auf zwei verschiedenen Ebenen und schliesst von der Wirkung auf die Ursache. Es wäre nämlich durchaus denkbar, dass die Summation erst im Gehör oder bei der späteren Verarbeitung stattfindet, während die verschiedenen Frequenzen in der Luft noch ihre eigenen Wege gehen.

Dass ferner die Erscheinung der Differenztöne als Argument für die ungestörte Superposition erhalten sollen, mutet seltsam an, sind sie doch gerade Ausdruck einer gestörten Überlagerung. Youngs Überlegung wird verständlich, wenn man berücksichtigt, dass seiner Auffassung gemäss die Frequenzerkennung nicht an eine bestimmte Schwingungsform gebunden ist. Periodizitäten verursachen Tonwahrnehmungen unabhängig davon, ob eine zugehörige Sinuskomponente vorhanden ist oder nicht. Young interpretiert Tartinis *Terzo suono* als Periodikton und nicht als Verzerrungsprodukt. Dem entspricht auch seine Bezeichnung als *grave harmonic*. Das Teilchen führt dabei eine kombinierte Schwingung aus, deren Periodizität dem wahrgenommenen, nicht in den Quellen vorhandenen, Ton entspricht. Im folgenden Zitat wird Youngs Verständnis der Superposition als Summe explizit:

Then, by supposing any two or more vibrations in the same direction to be combined, the joint motion will be represented by the sum or difference of the ordinates. When two sounds are of equal strength, and nearly of the same pitch, as in Fig. 36, the joint vibration is alternately very weak and very strong, producing the effect denominated a beat, Plate VI. Fig. 43, B and C; which is slower and more marked, as the sounds approach nearer to each other in frequency of vibrations; and, of these beats there may happen to be several orders, according to the periodical approximations of the numbers expressing the proportions of the vibrations. [Thomas Young 1800, 131]

Schliesslich wird, unter der Voraussetzung zweier oder mehr kombinierter Schwingungen in der gleichen Richtung, die gesamte Bewegung durch die Summe oder Differenz der Ordinaten dargestellt. Wenn die Töne von gleicher Stärke sind und nahezu von der gleichen Tonhöhe, wie in Fig. 36, wird die kombinierte Vibration abwechselungsweise sehr schwach und sehr stark und bewirkt den Effekt, den man eine Schwebung nennt, Tafel VI. Abb. 43, B und C; welche langsamer und deutlicher ist, je näher sich die Töne in der Frequenz der Schwingungen kommen; und von diesen Schwebungen gibt es mehrere Ordnungen, entsprechend den periodischen Annäherungen der Zahlen, welche die Verhältnisse der Schwingungen ausdrücken.

Die Kombination geht von Schwingungen in derselben Raumrichtung aus. Im Falle von Primärschwingungen in verschiedenen Raumrichtungen wäre die Summenbewegung in analoger Weise als Vektorsumme zu interpretieren.

„of these beats there may happen to be several orders, according to the periodical approximations“: Young meint damit Schwebungen für vom Einklang verschiedene

harmonische Intervalle, wie beispielsweise bei einer leicht verstimten Quinte. Die Beschäftigung mit Schwebungen höherer Ordnung geht auf Sauveur und Robert Smith [1749] zurück, dessen Theorie auf Periodizitätsbetrachtungen bei kombinierten periodischen Impulsmustern beruht [vgl. Kap. 3.2.5].

Bei einer verstimten Quinte sind Schwebungen zwischen Sinustönen im Rahmen einer reinen Ortstheorie schwer erklärbar, da bei normalen Lautstärken die Primärfrequenzen ausserhalb einer kritischen Bandbreite (ca. eine grosse Terz) liegen. Die Anregungszonen der beiden Sinustöne sind in diesem Fall auf der Basilarmembran disjunkt und erlauben deshalb eine ungestörte Übertragung ans Gehirn. Bei nicht sinusförmigen Primärtönen können die Schwebungen höherer Ordnung als Schwebungen zwischen Obertönen erklärt werden: Im Fall der verstimten Quinte schwebt der dritte Teilton des tieferen (2) mit dem zweiten Teilton des höheren Tons ($3 + \delta$), da $2 \cdot 3 \approx (3 + \delta) \cdot 2$. Die beiden Teiltöne schweben dabei mit der Schwebungsfrequenz 2δ , falls 2δ innerhalb der kritischen Bandbreite liegt.

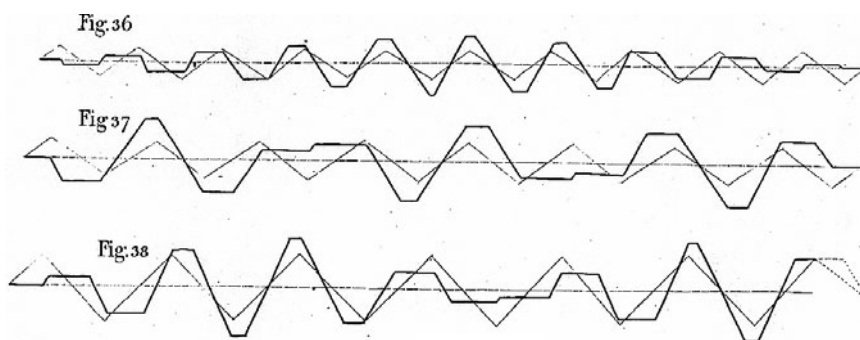
Young geht wie bereits erwähnt nicht von der Sinusschwingung als Elementarton aus, das heisst seine Schwebungstheorie ist unabhängig von der zugrundegelegten Schwingungsform und damit unabhängig von der spektralen Zusammensetzung der Eingangstöne.

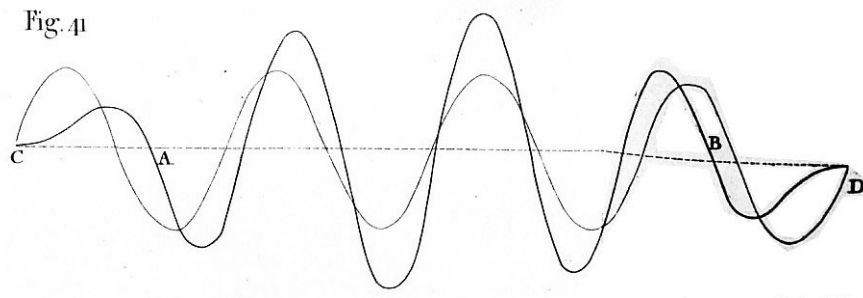
In the first place, to simplify the statement, let us suppose, what probably never precisely happens, that the particles of air, in transmitting the pulses, proceed and return with uniform motions; and, in order to represent their position to the eye, let the uniform progress of time be represented by the increase of the absciss, and the distance of the particle from its original position, by the ordinate, Fig. 33-38. [Thomas Young 1800, 131]

Nehmen wir vorerst zur Vereinfachung der Behauptung an, was wahrscheinlich nie genau so vorkommt, dass die Luftpartikel sich bei der Übertragung der Pulse in gleichförmiger Bewegung hin- und herbewegen, und, um ihre Position zu visualisieren, dass das gleichförmige Fortschreiten der Zeit durch eine Zunahme in der Abszisse und die Distanz des Teilchen von seiner ursprünglichen Lage durch die Ordinate dargestellt sei, Fig. 33-38.

Gleichförmige Bewegung ist dabei als Bewegung konstanter Geschwindigkeit zu verstehen, das heisst bei maximaler Auslenkung gibt es nur einen Wechsel der Bewegungsrichtung, nicht aber eine Änderung des Betrags der Geschwindigkeit. Die Luftpartikel verhalten sich unter dieser Vereinfachung wie bei einer vollständigen Reflexion an einer orthogonalen Platte. Daraus ergibt sich als Modell eines Tones eine Dreiecksschwingung mit gleichen Schenkeln.

Young gibt grafische Darstellungen von Zeitfunktionen für Schwebungen sowohl zwischen dreiecksförmigen als auch zwischen sinusförmigen Eingangsschwingungen [Thomas Young 1800, Plate 5, 150]:





Die der jeweiligen Summenkurve unterlegte periodische Sinus- bzw. Dreiecksschwingung stellt den dabei empfundenen Ton mit modulierender Stärke dar.

4.2.2. Hällström 1832: Kombinationstöne

Gustav Gabriel Hällström, *Von den Combinationstönen*, Annalen der Physik, Bd. 100, 1832, 438 – 466 [Hällström 1832]

Hällströms Aufsatz entstand gemäss eigener Angabe [Hällström 1832, 438] in seinen wesentlichen Teilen bereits 1819: *De tonis combinationis*. Aboe 1819, p. 44 in 4.

Die gleichzeitige Übertragung mehrerer Töne ohne gegenseitige Behinderung durch die Luft und andere Medien wird noch immer als rätselhaft angesehen:

Auch ist nicht ohne Schwierigkeit vollständig zu erklären, wie nicht bloß die so bewegliche Luft, sondern selbst die härtesten unter den starren Körpern nicht allein verworrene, sondern sogar articulirte und musicalische Töne fortzupflanzen vermögen, so daß, ohne eine Verschmelzung mehrerer zu einem, oder eine Störung eines durch mehrere, aus dem Zusammenklingen aller eine musicalische Harmonie entstehen und von uns gehört werden könne. [Hällström 1832, 438-439]

Störung und Verschmelzung wären Ausdruck einer unvollkommenen Übertragung. Die Harmonieerfahrung beruht auf den disparat erfahrbaren aber aufeinander bezogenen Einzeltönen und nicht etwa auf einem nicht mehr analysierbaren Verschmelzungsprodukt. Wenn aber durch das gleichzeitige Erklängen zweier Töne ein dritter Ton gehört werden kann, dann ist entweder von einer nicht völlig ungestörten Übertragung in der Luft oder von einem physiologischen oder psychologischen Phänomen auszugehen:

Hierher gehört der Streit zwischen den englischen Physikern Young und Gough über verschiedene zur Theorie des Schalls gehörige Punkte, welchen Vieth, mit einigen Zusätzen versehen, in Gilbert's Annalen (1805) Bd. XXI, S. 265, summarisch dargestellt hat. Dieser Streit betrifft hauptsächlich die sonderbare Erscheinung, daß wenn zwei Töne, die nicht im Einklang stehen, gleichzeitig angestimmt werden, oft ein dritter gehört wird, welcher von den Engländern *tiefer harmonischer Ton*, von Vieth aber, dem ich in diesem Aufsatz folgen werde, *Combinationston* genannt worden ist. Es ist dabei unter Anderem darüber gestritten worden, ob der Combinationston durch die Bewegung der den Schall fortpflanzenden Luft mechanisch hervorgebracht werde, wie Young mit den älteren Physikern behauptet, oder ob er seinen Ursprung dem Spiel der Einbildungskraft verdanke, welche Meinung Gough zu verteidigen scheint, indeß mit Gründen, die meines Erachtens von der Art sind, daß Niemand, der über diese Klasse von Erscheinungen reiflich nachgedacht hat, hinsichtlich derselben in Zweifel bleiben kann. [Hällström 1832, 439]

Unter das „Spiel der Einbildungskraft“ fallen wohl alle nicht bereits in der Schallquelle oder in der Luft auftretenden Töne. Die Frage ist demnach nur die, ob die Kombinationstöne in der an den Zuhörer angrenzenden Luft vorhanden sind oder nicht. Hällström geht davon aus, da die Kombinationstöne intersubjektiv gehört werden.

Wenn zwei Körper gleichzeitig ertönen, und die Zahl der in einer Secunde vollbrachten Schwingungen bei dem einen r , und bei dem andern s ist, welche Zahlen demnach die entstandenen Töne bedingen, so daß der eine r und der andere s genannt werden kann, so ist klar, daß das Ohr, zu welchem diese Töne mittelst der Luft fortgepflanzt werden, von geringerer Kraft ergriffen wird, wenn es die Impulse zu verschiedenen Zeiten empfängt, von stärkerer aber, wenn es sie gleichzeitig bekommt. [Hällström 1832, 439-440]

Schwingungen in den Schallquellen oder Luft führen zu Impulsen auf das Gehör. Die Krafterwirkung auf das Gehör summiert sich zu jedem Zeitpunkt, das heisst bei jeder Koinzidenz von Impulsen ist sie am grössten.

Nehmen wir $r=s$, so wird diese ungleiche Erregung des Ohrs nicht beobachtet, entweder weil in diesem Fall die beiden Körper ihre Schwingungen gleichzeitig anfangen, wodurch dann die Pulsationen dieser Körper der Reihe nach zugleich vollbracht werden und im Ohr anlangen, oder auch, wenn der Anfang der Schwingungen nicht gleichzeitig ist, weil die Pulsationen beider Körper sich dann niemals erreichen, wodurch dann immer ein und dasselbe gehört wird. Nehmen wir aber wie zuvor r und s ungleich an, so werden die Impulse, in wie ungleicher Zeit sie auch anfangen, sich doch nach einiger Zeit erreichen, und allemal, wenn dieß geschieht, wird das Ohr stärker angegriffen werden, und daher, während des Tönens, Schläge in gewisser Ordnung hören, welche, wenn sie einander nicht sehr rasch folgen, einzeln wahrgenommen und gezählt werden können, bei schneller Aufeinanderfolge aber so auf das Ohr wirken, wie wenn, außer den beiden gegebenen Körpern, noch ein dritter seine Pulsationen in dasselbe schickte, und solchergestalt die Empfindung eines dritten Tons hervorbringen, d. h. des Combinationstons, der in der That aus der Verbindung der beiden Töne entsprungen ist. [Hällström 1832, 440]

Falls die Pulsationen beim Einklang simultan erfolgen ergibt sich eine Verstärkung, das heisst eine grössere Lautstärke. Sind die Impulse aber nicht synchron wird „immer ein und dasselbe gehört“. Diese Beschreibung ist schwer nachvollziehbar. Jedenfalls verstärken sich die Einwirkungen nicht, sie treten aber häufiger auf, und falls die Impulse genau eine halbe Periode versetzt auftreten, erhält man die Oktave. Die Tonimpulse werden von Hällström offensichtlich nicht als Sinusfunktionen gedeutet. Andernfalls käme er zu einer anderen Vorstellung über die Superposition gleichfrequenter Töne.

Bei verschiedenen Frequenzen fallen die Impulse zwangsläufig immer wieder zusammen. Dies ist nicht richtig: Bei multiplen Frequenzverhältnissen und einer Versetzung um eine halbe Periode der grösseren Frequenz treffen die Impulse nie zusammen, und bei irrationalen Frequenzverhältnissen treten bis auf maximal einen Zeitpunkt nur approximative Koinzidenzen auf. Bei endlicher Impulsbreite überlappen sich diese wenigstens.

Gemäss Hällström wird in der *Edinburgh Encyclopaedia* im Artikel „Harmonics“ (Vol. X., p. 641) die Frequenz der Kombinationstöne von Brewster als Wiederholungsrate des kombinierten Signals angegeben [Hällström 1832, 441]. Diese Auffassung wird im folgenden ad absurdum geführt:

Es lehrt nämlich die Erfahrung, daß wenn zwei Töne, die anfangs im Einklang stehen, stufenweis immer mehr aus einander weichen, auch die Geschwindigkeit der Schläge ununterbrochen wächst, ohne daß dabei ein Sprung zu bemerken wäre. Nach der erwähnten Theorie aber müßten die Schläge zuweilen schneller, darauf zu gewissen Zeiten wieder langsamer, und dann abermals schneller auf

einander folgen; langsamer nämlich, wenn die Zahl der Oscillationen, welche diese Töne erzeugen, Primzahlen zu einander sind, rascher aber nothwendig, wenn sie einen gemeinschaftlichen Divisor besitzen. So werden die Töne, für welche die Oscillationszahlen $2r$ und $2r+1$ sind, beim gleichzeitigen Anstimmen nicht mehr als einen einzigen Schlag in der Secunde erzeugen. Sobald aber durch eine kleine Veränderung der Töne die Oscillationszahlen $2r$ und $2r+2$ werden, folglich einen gemeinschaftlichen Divisor bekommen, müßte nach der Theorie eine wenigstens doppelt so grosse Zahl von Schlägen entstehen, wogegen aber die Erfahrung lehrt, daß diese, wenn auch schon ein Ton hörbar ist, nicht plötzlich und sprungweise, sondern allmähig und stufenweise wächst. Nach der Theorie müßten ferner Töne, die sehr von einander abweichen, sobald die Zahlen r und s nur Primzahlen zueinander sind, wenig Schläge hervorbringen, und dennoch ist dieß nur der Fall, wenn r und s von beinahe gleicher Grösse sind, sonst aber wird ein deutlicher Combinationston gehört. [Hällström 1832, 441-442]

Mit „Primzahlen zu einander“ sind teilerfremde Zahlen gemeint. Die Veränderung des oberen Tons im Frequenzverhältnis $100 : 101$ zu $100 : 102$ hat eine Verdoppelung der Gesamtperiodizität von 1 auf 2 zur Folge. Bei $100 : 103$ ist sie aber bereits wieder die ursprüngliche. Bei $99 : 102$ hingegen steigt sie auf das Dreifache, denn der grösste gemeinsame Teiler ist hier 3.

Die unverhältnismässige Auswirkung leicht veränderter Frequenzverhältnisse auf die Periodizität der kombinierten Töne zeigt sich insbesondere auch bei temperierten Intervallen. So ergibt sich für unterschiedliche Ausprägungen der grossen Sexte über $\bar{c} = 512$ folgendes Bild [Hällström 1832, 442-443]

Proportion	Periodizität	Periodiktonhöhe
$3 : 5$	$170\frac{2}{3}$	F
$16 : 27$	32	<u>C</u>
$161 : 270$	3.2	

Die Periodizität variiert dabei um einen Faktor von mehr als 50. Die Periodizität liegt im zweiten Fall knapp über der unteren Hörgrenze, im dritten wesentlich darunter. Diese grosse Auswirkung kleinster Veränderung widerspricht der für Naturgesetze selbverständlichen Einfachheit:

Die Einfachheit der Natur und ihrer Gesetze gestattet nicht, daß solche Sprünge aus einer sonst kaum merklichen Veränderung hervorgehen, und dieß spricht daher desto zuverlässiger gegen die allgemeine Zulässigkeit der Theorie, als die Erfahrung unzweifelhaft beweist, daß die Töne \bar{c} und \bar{a} den Combinationston f hervorbringen, wie leicht zu hören, aber aus dieser Theorie nicht zu beweisen ist. Zwar wird behauptet, daß das verwickeltere Verhältnis $161 : 270$ in ähnlichen Fällen wie dieser nicht anwendbar sey, sondern daß stattdessen das einfachere, wenn gleich approximative, z. B. $3 : 5$, oder $31 : 52$, oder $65 : 109$, genommen werden müsse, welche durch Kettenbrüche zu findende Verhältnisse (Siehe Weber in Poggend. Ann. Bd. XV (91) S. 219) repective die Combinationstöne oder Schlägezah 170,7 (171,7), 16,5 und 7,9 geben. Hinge es demnach von unserem Gutdünken ab, welchen Werth wir zu nehmen hätten? Gewiss wäre dieß nicht naturgemäß. [Hällström 1832, 443]

Entscheidend zuungunsten der Deutung des Kombinationstons als Periodikton ist in diesem Beispiel die Abweichung des Kombinationstons um eine Oktave über der maximal möglichen Periodizitätstonhöhe. Da $3 : 5$ die Repräsentation der grossen Sexte über c' mit den kleinsten Zahlen darstellt, ist ein höherer Periodikton als F (=1) unmöglich. Gehört wird aber f (=2). Die Approximation temperierter Intervalle durch Kettenbrüche führt zwar zu kleineren Frequenzverhältnissen, ist aber willkürlich und uneindeutig, da nicht durch die Natur

vorgegeben ist, wann eine Kettenbruchentwicklung abubrechen ist. Kettenbrüche sind Ausdrücke der Form:

$$a + \frac{1}{b + \frac{1}{c + \frac{1}{d + \dots}}}$$

Bei unendlichen Koeffizientenfolgen (a, b, c, d, ...) können auch irrationale Zahlen als Kettenbrüche dargestellt werden.

Es seyen wie vorhin, r und s die Oscillationsmengen der gleichzeitig angestimmten Töne, und x die Oscillationsanzahl des zugehörigen Combinationstons, so erhellt leicht, daß in derselben Zeit $\frac{1}{x}$, in der eine einzige Oscillation dieses Combinationstons vollbracht wird, die tönenden Körper respective $\frac{r}{x}$ und $\frac{s}{x}$ Oscillationen machen. Diese aber, wenn aus ihrem Zusammenklingen eine einzige Pulsation hervorgehen soll, müssen nothwendigerweise in solchem Verhältniß stehen, daß die Zahl $\frac{s}{x}$ um eine Einheit die Zahl $\frac{r}{x}$ übertrifft, so daß für die Zeit $\frac{1}{x}$ ist: $\frac{s}{x} = \frac{r}{x} + 1$, wodurch man für eine Secunde hat $x = s - r$. Sobald also die zugleich erklingenden Töne r und s mit ihren Combinationszahlen gegeben sind, ist es sehr leicht ihren Oscillationston s-r aufzufinden, welcher indeß nur als der vorzüglichste oder erste unter mehreren ähnlichen betrachtet werden muß. Auf ähnliche Weise bringt nämlich der bereits erzeugte Oscillationston mit dem gleichzeitig erklingenden Ton r einen zweiten Oscillationston hervor, dieser mit s einen dritten und so fort, welche indeß nicht immer von solcher Stärke sind, daß sie in Wirklichkeit alle gehört werden könnten. [Hällström 1832, 143-144]

Ein erzeugter Kombinationston erzeugt mit den Primärtönen weitere Kombinationstöne und diese wiederum und auch untereinander [Hällström 1832, 444]:

Ursprüngliche Töne.	Combinationstöne.
r, s	s — r erster
s — r, r	2r — s zweiter
2r — s, s	2(s — r) dritter
2r — s, s — r	3r — 2s vierter
u. s. w.	u. s. w.

Die Auflistung entspricht modernen Darstellungen der Differenztöne höherer Ordnung. Diese letzteren sind je nach zugrundeliegendem Frequenzverhältnis verschieden deutlich und treten in verschiedener Anzahl auf:

So z. B. haben

die gleichzeitig angestimmten Töne.	nicht mehr Combinationstöne als:
$\overline{c}, \overline{g}$	einen
$\overline{e}, \overline{h}$	
$\overline{d}, \overline{g}$	zwei
$\overline{c}, \overline{f}$	
$\overline{c}, \overline{e}$	drei
$\overline{d}, \overline{f\sharp}$	
$\overline{d}, \overline{h}$	vier
$\overline{e}, \overline{g}$	
u. s. w.	u. s. w.

[Hällström 1832, 445]

Diese Theorie ist so einfach, daß sie dadurch fast verdächtig wird. Bevor ich daher volles Zutrauen schenkte, habe ich sie der strengen Probe des Experiments unterworfen. [Hällström 1832, 445]

Tatsächlich ist dieses Verfahren einfach und mechanisch durchführbar, im Unterschied zur iterativen Bestimmung der Periodizität – des grössten gemeinsamen Teilers – mit Hilfe des euklidischen Algorithmus. Und insbesondere haben kleine Frequenzänderungen der Primärtöne nur kleine Abweichungen in den Tonhöhen der Kombinationstöne zur Folge. Es folgen minutiöse Messungen an Intervallen auf einer Orgel mit Fehlerabschätzungen und Vergleichen zu den theoretisch zu erwartenden Kombinationstönen.

Vielfältig bestätigte die Erfahrung zu Gunsten der Theorie die sonderbare, und mir wenigstens unerwartet gekommene Erscheinung von abgeleiteten oder secundären Combinationstönen, welche von den primären oder vorangehenden, selbst wenn diese auch mit der größten Aufmerksamkeit nicht hörbar sind, hervorgebracht werden. [...] Unsere Fähigkeit dieselben zu beobachten, scheint von ihrer gegenseitigen Tonhöhe und von ihrem Verhältniß zu den ursprünglich angestimmten abzuhängen, indem wir nämlich die tieferen wegen ihrer Rauheit nicht leicht unterscheiden können, die höheren aber mit den ursprünglich angestimmten stärker ertönenden verwechseln. Dazu kommt noch, daß wir die harmonisch consonirenden Töne leichter von einander unterscheiden, die dissonirenden aber, vor Allem wenn ihrer mehrere zugleich ertönen, unter dem von ihnen hervorgebrachten Wirrwarr einzelne nicht mehr zu erkennen vermögen, wovon die vorhin erwähnte Combination $\overline{c\sharp}$ und \overline{ee} ein Beispiel liefert. Indeß folgt daraus nicht, daß wir bloß consonirende Combinationstöne wahrzunehmen vermögen, wie Young zu glauben scheint, der, mit seinen Landsleuten, diese Töne *harmonische* nennt; vielmehr sind auch oft äusserst dissonirende zu hören [...] [Hällström 1832, 463]

Zu Weber (Poggendorfs Annalen, Bd. XV (91) S. 216), der koexistierende verschiedene Kettenbruchapproximationen zur Erklärung mehrerer gleichzeitiger Kombinationstöne annimmt, meint Hällström:

Jener Physiker spricht zunächst von dem Grunde, durch welchen es möglich wird, zwei Combinationstöne zugleich zu hören, und meint, dieser liege darin, daß es für die gleichzeitig angestimmten Töne zwei genäherte Verhältnisse gebe, welche beide zur Bestimmung des Combinationstons dienen können. [...]

Es würde nämlich unzweifelhaft daraus folgen, daß Töne, deren Verhältniß ganz bestimmt und hinreichend einfach wäre, der Annäherung also nicht bedürfte, nicht mehr als einen Combinationston geben könnte, was indeß gegen die Erfahrung ist.

So z.B. geben die Töne \bar{c} und \bar{e} , deren Verhältniß hinreichend genau durch das sehr einfache 4 : 5 ausgedrückt werden kann, dennoch zwei Combinationstöne, nämlich c und \bar{g} , von denen der erstere, welcher bisher als der alleinige und ächte betrachtet worden ist, nur schwach gehört wird, der letztere aber, obgleich er nur der secundäre ist, so stark und deutlich, daß in Betreff seiner kein Zweifel stattfinden kann. [Hällström 1832, 464]

4.2.3. Ohm 1839: Kombinationstöne und Schwebungen

Georg Simon Ohm, *Bemerkungen über Combinationstöne und Stöße*, Poggendorff's Annalen Bd. XXXXVII, 1839, 463-466 [Ohm 1839]

Ohm unterscheidet in diesem frühen Aufsatz zwei Arten von Kombinationstönen:

Ist $m' : n'$ das Tonverhältniß zweier Töne, so daß deren Schwingungsmengen durch $m'd$ und $n'd$ vorgestellt werden können, so wird bei dem gleichzeitigen Erklängen jener beiden Töne stets ein Combinationston erzeugt, dessen Schwingungsmenge d ist. Dieß ist der vor Hällström bekannte Combinationston, welcher durchaus an keine Ordnung geknüpft ist, weßwegen ich ihn den unbedingten nenne; aber seine Stärke, welche den Werth $\frac{m'+n'}{m'n'}$, wobei die Stärke der ihn erzeugenden Töne als

Einheit zu Grunde gelegt worden ist, nie erreicht, ist in den meisten Fällen zu gering, als daß er gehört werden könnte.

Außer diesem unbedingten Combinationston ist noch ein anderer möglich, dessen Schwingungsmenge $(m'-n')d$ ist, wenn m' die größere der beiden Zahlen m' und n' bezeichnet. Es ist dieß der von Hällström sogenannte | *erste* Combinationston. Sein Erscheinen ist jedoch an die Bedingung geknüpft, daß die Schwingungsformen der beiden ihn erzeugenden Töne einander ähnlich seyen, weßwegen ich ihn den *bedingten* nenne. [Ohm 1839, 463-464]

Mit $m' : n'$ ist das gekürzte Frequenzverhältnis gemeint. Der unbedingte Kombinationston hat die Tonhöhe, die der Periodizität des zusammengesetzten Schallsignals entspricht. Er dürfte gemäss Ohm späteren Äusserungen (1843-1844) in der Auseinandersetzung mit Seebeck gar nicht existieren, denn es gibt im zugehörigen Schallsignal keine ihm entsprechende Fourierkomponente.

Alle anderen Kombinationstöne gehören gemäss Ohms Einteilung zu den bedingten Kombinationstönen. In heutiger Terminologie wird nur für diese der Begriff Kombinationston verwendet. Die Stärke des Differenztons erster Ordnung hängt gemäss Ohm von der Signalgestalt der beiden Primärtöne ab. Falls die Signalgestalt der beiden Primärtöne zu verschieden ist, kann kein Differenzton entstehen. Zwischen Flöte („Sinusschwingung“) und Violine („Sägezahnschwingung“) dürften demnach keine Differenztöne erster Ordnung entstehen. Bei einer kleinen Sexte $e'c''$ (5 : 8) beispielsweise darf nach dieser Auffassung zwischen Violine und Flöte kein Differenzton g ($3 = 8 - 5$) entstehen.

Als Folge des sehr ungewöhnlichen Baues des bedingten Combinationstones findet man, daß zu dessen Möglichkeit $\frac{m'+n'}{2(m'-n')} > 1$ seyn müsse, während dessen Stärke die Zahl $\frac{m'}{n'} - \frac{n'}{m'}$ nie ganz erreichen

kann; er wird umso schwächer, je mehr $m' = n'$ wird, und umso undeutlicher je mehr $m'+n' = 2(m'-n')$, d.h. je mehr $m' = 3n'$ wird. Hieraus folgt, daß das Tonverhältniß der beiden Töne, welche den bedingten Combinationston liefern sollen, stets zwischen 1 : 1 und 1 : 3 liegen müsse. [Ohm 1839, 464]

Bei kleinen Intervallen wird anstelle des Differenztons das arithmetische Mittel der Primärfrequenzen gehört. Schwebungen erscheinen in dieser Deutung als Ausdruck des

gleichen Phänomens wie die Differenztöne (eine Ansicht, der von Helmholtz widersprochen wird):

Als eine weitere Folge des wundersamen Baues des bedingten Combinationstones dringt sich einem der Gedanke auf, daß in Fällen, wo dieser Combinationston zu schwach wird, um gehört werden zu können, wie z.B. wenn die beiden angegebenen Töne nur um einen halben Ton aus einander liegen, sich derjenige Ton hören lassen müsse, welcher genau in der Mitte zwischen den beiden angegebenen liegt, wiewohl die theoretische Betrachtung zeigt, daß derselbe beständigen Unterbrechungen ausgesetzt ist. [Ohm 1839, 464]

Der Differenzton hat eine wohldefinierte Schwingungsform. Sie ist aber immer von der Schwingungsform der Primärtöne verschieden, deshalb können sie, entgegen Hüllströms Auffassung, mit den Primärtönen keine Differenztöne höherer Ordnung bilden:

Da die Schwingungsform des Hüllström'schen ersten Combinationstones den Schwingungsformen der ihn erzeugenden Töne nothwendigerweise immer sehr unähnlich werden muß, so kann dieser erste Combinationston mit keinem der beiden ursprünglichen Töne einen ferneren Combinationston liefern, wie Hüllström zur Erlangung seiner folgenden Combinationstöne anzunehmen sich veranlaßt sah. Dagegen gibt es einen anderen ebenso kurzen Weg zu diesen folgenden, in der Erfahrung gegründeten, Combinationstönen zu gelangen, wenn man sie aus den, die ursprünglichen Töne begleitenden, harmonischen Tönen hervorgehen läßt; denn man sieht auf der Stelle ein, daß man so ganz auf dieselben Töne stößt, welche Hüllström nach seiner Ansicht findet, wenn die erzeugenden Töne durch schwingende Saiten oder Luftsäulen gebildet werden. Gehen hingegen die ursprünglichen Töne aus schwingenden Stäben hervor, so könnten die von Hüllström aufgestellten folgenden Combinationstöne hier nicht mehr entstehen, weil hier die Begleittöne ein anderes Gesetz einhalten; und hierin liegt zugleich ein Mittel, auf dem Erfahrungswege zu entscheiden, welcher von beiden Wegen stets zum Ziele führt. [Ohm 1839, 464-465]

Die vermeintlichen Kombinationstöne höherer Ordnung sind gemäss Ohm Differenztöne erster Ordnung zwischen Obertönen. Dies ist die erste Stelle wo Ohm auf Obertöne zurückgreift.

Schwebungen/Stösse können nach Ohms Untersuchungen nur dann entstehen, wenn die realen Frequenzverhältnissen nur wenig von einem einfachen Frequenzverhältnis abweichen. Für die Herleitung der Ergebnisse wird auf die Zukunft vertröstet. Eine betreffende Publikation ist nie erschienen. Ohm hat nach dem Streit mit Seebeck nicht mehr zum Thema Akustik publiziert.:

Auf ungleich größere Schwierigkeiten stieß ich bei der Aufsuchung der Stöße, welche aus dem gleichzeitigen Erklängen zweier Töne hervorgehen, weßwegen ich auch den hierbei eingehaltenen Rechnungsgang lieber noch zurückhalte [...]

Als Resultat meiner Untersuchungen fand ich, daß wahrnehmbare und regelmäßige, d.h. in gleichen Abständen von einander auftretende Stöße im Allgemeinen nur dann entstehen können, wenn die Schwingungsmengen m und n der beiden angegebenen Töne sich einem, in seinen kleinsten ganzen Zahlen gegebenen Tonverhältnisse $m' : n'$ sehr nähern, und zugleich die Zahlen m' und n' sehr klein sind in Vergleich zu jenen, auf die man stößt, wenn man das Verhältniß $m : n$ in seinen kleinsten ganzen Zahlen ausdrückt. Es entstehen dann jedesmal $mn' - m'n$ Stöße in der Zeiteinheit, und diese Stöße werden gebildet durch einen Ton, dessen Schwingungsmenge $\frac{m'+n'}{m'+n'}$ ist, welcher aber $mn' - m'n$ Mal in der Zeiteinheit seine Schwingungsform stark verändert und wieder herstellt. Die Stärke dieser Stöße wird durch die Zahl $\frac{m'+n'}{m'n'}$ angezeigt.

Dabei zeigte sich's, daß diese Stöße unabhängig von den Combinationstönen sowohl als von den Begleittönen sind. [Ohm 1839, 465-466]

Die gemachten Aussagen zur Stärke der Schwebungen sind damit blossе Behauptungen. Helmholtz hat die Überlagerung von Sinusschwingungen mit verschiedener Amplituden und verschiedener Frequenz durchgerechnet.

4.2.4. Helmholtz: Differenz- und Summationstöne

Helmholtz weist in der *Lehre der Tonempfindungen* darauf hin, dass die ungestörte Überlagerung von Schwingungen

[...] in voller Strenge nur gilt, wo die Schwingungen an allen Stellen des Luftraumes und der tönenden elastischen Körper von unendlich kleiner Grösse sind [...] [Helmholtz 1863, 228]

In allen anderen Fällen komme es zur Ausprägung von Kombinationstönen.

In Formeln: $a \oplus b = a + b + f(a, b)$, dabei bedeutet $a \oplus b$ das Signal, das aus der Überlagerung der beiden Eingangssignale a, b entsteht. Das $+$ -Zeichen auf der rechten Seite bedeutet die gewöhnliche Addition der Signale (Summe der Auslenkungen zu jedem Zeitpunkt). Der Ausdruck $f(a, b)$ ist der Korrekturterm, der die Abweichung des Ergebnisses von der idealen ungestörten Überlagerung beschreibt. Bei kleinen Eingangsamplituden kann der Korrekturterm vernachlässigt werden. Es gilt dann $a \oplus b = a + b$ da $f(a, b) = 0$, das heisst ideale, ungestörte Überlagerung. Differenztöne sind (additive) Sinusbestandteile des Korrekturterms. Ihr Name kommt daher, dass ihre Frequenz im einfachsten Fall die Differenz der Eingangsfrequenzen ist. Helmholtz weist theoretisch und experimentell nach, dass im Korrekturterm auch eine Sinuskomponente zur Frequenzsumme der Eingangsfrequenzen vorkommen kann. Dies zeige die unterschiedliche Natur von Schwebungen und Differenztönen, denn durch Schwebungen können keine Periodiktöne entstehen, die höher als die Primärtöne sind.

Mathematisch ergeben sich die Kombinationstonfrequenzen aus der Reihenentwicklung von $a \oplus b$, experimentell mit Hilfe der Resonanz. Zum Beispiel werden Kombinationstöne, die bereits bei der Überlagerung starker Schwingungen in der Luft entstehen, daran erkannt, dass ein mechanisches Resonanzsystem Schwingungsmoden zeigt, die es bei je einzelner Präsentation der Eingangssignale a, b nicht hat. Angenommen bei der nicht störungsfreien Überlagerung der grosse Sexte c'' - a'' (3 : 5) habe neben den Primärtönen allein der Differenzton eine nennenswerte Stärke, dann können durch selektive Verstärkung mit Resonanzkugeln die Töne $f(5-3 = 2)$, c'' und a'' nachgewiesen werden. Hingegen bleiben Resonanzkugeln zu f und zu anderen beliebigen Tonhöhen stumm.

Beispiele für in der Luft vorhandene Kombinationstöne ergeben sich bei der mehrstimmigen Sirene, die von einem einzigen Windkasten bedient wird oder bei der Physharmonica [Helmholtz 1863, 229]. Daneben gibt es auch Kombinationstöne, die erst im Gehör entstehen: Diese lassen sich indirekt dadurch nachweisen, dass auf sie eingestimmte Membranen im Widerspruch zum Höreindruck stehen. Auf der Basilarmembran sind sie den äusseren Kombinationstönen gleichwertig und sie können untereinander und mit Primärtönen Schwebungen und Rauigkeitsempfindung hervorrufen. Für die tatsächlichen Rauigkeitsverhältnisse bei Konsonanzen und bei Instrumentaltönen mit reichhaltigem Spektrum ist deshalb ihr Effekt zu berücksichtigen. Durch Helmholtz' Deutung erhalten Kombinationstöne einen Existenzstatus, der heute mit den Begriffen *Ohrspektrums* oder *inneres Spektrum* eingefangen wird.

Wesentliche Fortschritte in der Deutung der nicht linearen Funktionsweise des Gehörs finden sich bei Békésy [1934]. Er lokalisiert die Entstehung der subjektiven Obertöne in der Cochlea und diejenigen der Differenztöne im Mittelohr. Dies erkläre, weshalb die selektiven Verzerrungen im Gehör weniger stark ausfallen als bei einem vergleichbaren mechanischem Übertragungssystem, das für einen Sinusston gleich starke Obertöne produziert. Beide Effekte sind gemäss Békésy also nicht nervösen Ursprungs.

Insbesondere erhält das Harfenmodell der Frequenzverarbeitung [De Mairan, 1737; Helmholtz 1863] wesentliche Korrekturen, dahingehend, dass es auf der Basilarmembran zu keinen stehenden Schwingungen von Querfasern – den Harfensaiten – kommt, da sie gar nicht unter Spannung steht. Für die heute akzeptierte wesentlich komplexere Vorstellung der Zusammenwirkung von Wanderwellen in der Schneckenflüssigkeit und Mechanik der Reizauslösung wird das Harfenmodell zur blossen Hilfsvorstellung zur Harfenmetapher [vgl. Boer 1979].

4.3. Zungenpfeifen und Vokale als Modelle des Tons

Während das Paradigma der schwingenden Saite, die Entstehung des Tons und seiner Klangqualitäten als ungeteilten Vorgang suggeriert, bieten sich Zungenpfeifen als Modell einer zusammengesetzten Klangbildung an. Wenn es bei Willis gelingt, die Vokaltöne mit Hilfe von Orgelpfeifen zu imitieren, erlauben diese stellvertretend für die weniger gut zugängliche Untersuchung des menschlichen Stimmapparats, eine physikalische Analyse. Die Auftrennung in tongebendes und klangformendes Subsystem zeichnet sich bereits bei Dodard [1700] [vgl. Kap. 2.5.6] ab. Der Analyseansatz von Euler, der von Willis angewendet wird und der Schwingungen als stehende Wellen, das heisst als Superposition gegenläufiger Wellen, deutet, führt einerseits zu einer Deutung des Zeitverhaltens der Luftdruckschwankung in den Zungenpfeifen und eine darauf basierende Parametrisierung der Vokale. Andererseits ergibt sich bei einer Rückübertragung des Zungenpfeifenmodells auf die Stimme ihre zusammengesetzte Natur schier zwangsläufig, wenn aus gleichen Wirkungen auf gleiche Ursachen geschlossen wird. Die geringe Phasensensitivität des Gehörs zeigt aber, dass die Gleichheit der Ursachen nicht im Sinne von Gleichheit der Zeitfunktionen zu deuten ist. Insofern ermöglicht erst die „Ohm/Helmholtzsche Phasentaubheit“ eine konsistente spektrale Deutung der Vokale. Die „gleichen Ursachen“ sind dabei in der Ähnlichkeit der Amplitudenspektren und nicht in den Zeitfunktionen zu suchen.

Rückblickend unter dem Paradigma des Zungenpfeifentons ergibt sich Prateorius' [1619] und Jaucourts [Artikel *timbre*, Encyclopédie 1765] Gebrauch des Resonanzbegriffs für die Klangfarbe beziehungsweise *timbre* in kanonischer Weise.

4.3.1. Wilhelm Weber

Ueber die Construction und den Gebrauch der Zungenpfeifen, Annalen der Physik und Chemie, 1829, Sechstes Stück, 193-206 [Weber W. 1829 a]

Versuche mit Zungenpfeifen, Annalen der Physik und Chemie, 1829, Siebtes Stück, 415-438 [Weber W. 1829 b]

Eine Motivation Webers zur Beschäftigung mit Zungenpfeifen war seine Absicht, Töne konstanter Tonhöhe mit variabler Lautstärke zu erzeugen. Dies kann als Belebungsversuch

des Orgelklangs hin zur „Expressiv-Orgel“ im Sinne von Erard/Berlioz verstanden werden [vgl. Kap. 4.4.6]. Primäres Anliegen für Weber war die Erzeugung von frequenzstabilen Normaltönen, als Alternative zu Stimmgabeln.

Weber versteht die Zungenpfeife als rückgekoppeltes System der Tonerzeugung. Im Zusammenhang mit baulichen Modifikationen an Zungenpfeifen fällt der Begriff *timbre*:

Ich habe bis jetzt gewöhnlich cylindrische Röhren zum Luftcanal der Zungenpfeife angewandt; man kann aber auch dazu rechtwinklicht prismatische Röhren gebrauchen, und man hat dann sogar den doppelten Vorteil, daß die Luftschwingungen in dieser Röhre, weil alle Schnitte senkrecht auf die Platte gleich sind, noch einfacher werden, und zugleich durch das Verhältniß der Breite und Dicke der Röhre, die Stärke und der Klang (*timbre*) des Tones moderirt werden kann. [Weber W. 1829 a, 196]

Und an anderer Stelle ausführlicher:

Bei fast allen musikalischen Instrumenten weiß man, daß ihr Klang, oder die eigenthümlichen Eigenschaften ihrer Töne, welche die Franzosen unter der Benennung *timbre* zusammenfassen, vorzüglich von den den selbsttönenden Körper umgebenden und mitschwingenden Theilen herrühre. Z. B. ändert sich der Klang einer Violine nicht, wenn man andere Saiten aufzieht; sobald man aber etwas an den bloß mitschwingenden Brettern der Violine abändert, so erhält die Violine einen ganz andern Klang. Ja die Dämpfung bei einer Violine wird bloß dadurch hervorgebracht, daß man das Gewicht des Steges, über welchen die Saiten gehen, etwas schwerer macht, ohne die Saiten selbst im Geringsten zu berühren.

Diese auffallenden Erscheinungen zeigen sich nun ganz besonders bei Zungenpfeifen, wo die Luftsäule nicht etwa der schwingenden Platte fortwährend einen gleichförmigen Widerstand entgegensetzt, sondern selbst mit in Schwingung geräth, und dadurch eine viel heftigere Rückwirkung auf die schwingende Platte hervorbringen kann.

Man kann daher die Zungenpfeife benutzen, diese Erscheinungen gemeinschaftlich schwingender Körper zu beobachten, indem man sie so einrichten kann, daß die Wirkung dieser Vereinigung mehr in der Dauer der Schwingungen als im Klange der Töne wahrgenommen wird, welches den Vorteil hat, daß man sie genau messen kann.

Es kommt z. B. der Fall vor, wo die elastische Metallplatte, um synchronisch mit der Luftsäule zu schwingen, die Dauer ihrer Schwingungen um das Doppelte ändert, daß heißt, eine einzige Schwingung in derselben Zeit macht, in welcher sie allein 2 Schwingungen gemacht haben würde; [...] [Weber W. 1829 a, 203-204]

Modifikation am Resonanzsystem haben einen stärkeren Einfluss auf die Klangqualität als das Ersetzen einer alten durch eine neue Saite. Der Tonentstehungsvorgang ist also klar zweigeteilt in verursachende Schwingung und modifizierende Resonanz.

Durch geeignete Kombination der beiden Komponenten der Schallerzeugung soll durch Kompensation eine konstante Tonhöhe erzwungen werden:

Weil nun beide Körper so untereinander verbunden sind, daß sie nur gemeinschaftlich *einen* Ton hervorbringen können, so kann derselbe beim Anschwellen oder Abnehmen gar keine Höhenänderung erleiden, denn er würde durch die Wirkung auf den einen Körper um eben so viel höher, als durch die auf den andern Körper tiefer werden müssen. [Weber W. 1829 b, 416]

Bei Ersetzen der Luftsäule einer sehr kurzen Orgelpfeife durch die Mundhöhle und Anblasen der Zunge mit der Atemluft verändere sich die Tonhöhe nur unwesentlich, die Klangfarbe aber überhaupt nicht:

Unter diesen Umständen entstand ein Ton, der seiner Höhe nach *fast* derselbe, seinem Klange (*timbre*) nach aber *völlig* derselbe war, als wenn eine kurze Luftsäule mitgeschwungen hätte. [Weber W. 1829 b, 422]

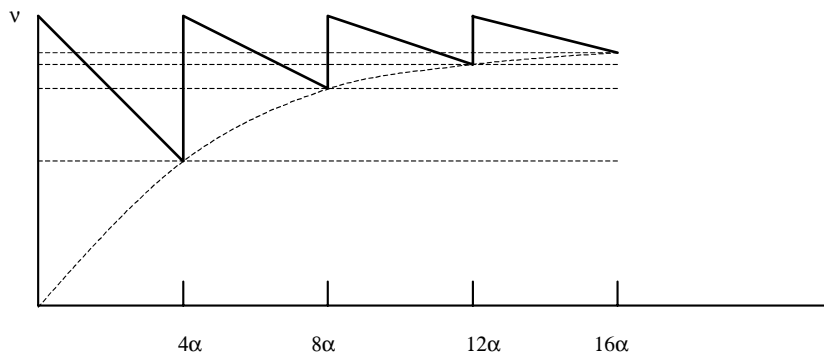
Daraus ist zu schliessen, dass die beiden Resonanzsysteme eine ähnliche Rückstrahlcharakteristik haben. Die Veränderung der Tonhöhe ergibt sich durch ein veränderter Rückkopplungseffekt. Beinflusst wird nur die Zungenfrequenz nicht die Art ihrer Schwingung.

Weber ermittelt die Tonhöhe in Abhängigkeit von der Länge der Luftsäule: sie wird bei zunehmender Länge stetig tiefer, springt dann aber in den Anfangston zurück, dies in periodisch gleichen Längenabständen. Dabei wird das Intervall, um welches die Tonhöhe jeweils absinkt, jedesmal kleiner und zwar entsprechend den Frequenzverhältnissen

$$1 : 2, 3 : 4, 5 : 6, \dots, (2n-1) : 2n.$$

[Weber W. 1829 b, 428]

Daraus ergibt sich qualitativ folgendes Bild für den Frequenzverlauf als Funktion der Länge der Pfeife (die Frequenzverminderung ist dabei willkürlich als linear angenommen):



Weber kommentiert seine eigene Untersuchung folgendermassen:

Wenn es zu irgend einem praktischen Zwecke nöthig werden sollte, würde es mir leicht seyn, alle in dieser Abhandlung mitgetheilten, und überhaupt alle von mir mit diesen Tonwerkzeugen angestellte Versuche durch *empirische Interpolationsformeln* zusammenzufassen, welche sich dann innerhalb der Grenzen, innerhalb welcher die Versuche selbst aufgestellt worden sind, auf gleiche Weise zu allen Anwendungen gebrauchen lassen würden, als hätte man die *wahren* Gesetze der Natur selbst aufgefunden.

Statt aber diese Interpolationsformeln zu entwickeln, würde es größere Vortheile haben, aus der wahren und naturgemäßen Vorstellung der Tonerregung und des ganzen Hergangs in unserer aus Platte und Luftsäule zusammengesetzten Vorrichtung [...] die *wahre* Theorie aller dabei entstehenden und fortdauernden Bewegungen und Schwingungen aufzustellen [...] [Weber W. 1829 b, 433]

Er gesteht also ein, dass die zusammengesetzte Tonerzeugung bei Zungenpfeifen noch nicht völlig verstanden ist. Das Aufstellen von Interpolationsformeln hätte rein deskriptiven Charakter und könnte also für die Konstruktion von Nutzen sein, nicht aber für das Verständnis der dahinterliegenden Physik. Vermutlich schwebt ihm eine Theorie analog derjenige der schwingenden Saite vor, wie sie von Euler und Bernoulli entwickelt wurde. Sein Erklärungsansatz durch Vergleich mit den Labialpfeifen weist in die richtige Richtung:

Eine ähnliche periodische Wiederkehr der Erscheinungen zeigt sich auch bei allmählicher Verlängerung einer bloßen *Luftsäule* oder einfachen *Labialpfeife*, und rührt daher, daß mit jeder neuen Periode oder Wiederkehr desselben Tones die Zahl der Schwingungsknoten der Luftsäule um 1 zunimmt. [Weber W. 1829 b, 434]

Betrachten wir den Anfang und Schluß jeder Periode, zwischen welchen die Länge der Luftsäule um $4a$ zunimmt, so finden wir endlich, daß die stets synchronisch mit der Platte schwingende Luftsäule im Anfange jeder Periode wie eine offene Labialpfeife, am Schlusse jeder Periode wie eine gedeckte Labialpfeife schwingt. [Weber W. 1829 b, 436]

Im Allgemeinen verhält sich die Dauer der Schwingungen zweier gleich langer Luftsäulen, von welchen die eine an beiden Enden offen, die andere am einen Ende verschlossen ist, wenn beide ihren n ten Ton, den Grundton mitgerechnet, geben, wie $2n : 2n-1$. [Weber W. 1829 b, 437, Fussn.]

Die Variation in der Ordnungszahl der ansprechenden Eigentöne führt Weber nicht zu einer explizit spektralen Klangfarbentheorie, weil sein Fokus entschieden die Kontrolle über den Parameter Tonhöhe ist, da dieser im Sinne von Praetorius einfach quantifizierbar ist.

4.3.2. Willis 1832

Ueber Vocaltöne und Zungenpfeifen, Poggendorfs Annalen, 24, 1832, 397–437 [Willis 1832]

Ziel von Robert Willis' Untersuchung ist zum einen die Synthese von Vokalklängen auf mechanischem Wege mit Hilfe von Zungenpfeifen. Er verwendet Elfenbeinzungen, die auf der schlagenden Seite mit Leder überzogen sind und beobachtet die Wirkung der verschiedenen Geometrie des Resonanzkörpers unter Verwendung derselben Zunge. Zu diesem Zweck macht er auch Gebrauch von ausziehbaren Resonanzröhren. Zum anderen ist Willis an einer allgemeinen theoretischen Erklärung der Vokalklangfarben interessiert. Sein Ansatz beruht auf der Analyse des Zeitverhaltens des rückgekoppelten Schwingungssystems aus Zunge und Resonanzkörper und ist in der mathematischen Durchführung am Vorgehen von Euler bei der Untersuchung der Labialpfeifen orientiert: Die stehende Welle der Luftsäule ergibt sich aus der Superposition von hin- und herlaufenden Störungen. In moderner Terminologie ausgedrückt sind die Vokale gemäss Willis' Auffassung durch einen einzigen Formanten bestimmt.

Die Arbeit von Willis kann als Antwort auf von Weber aufgeworfene Frage nach der Physik der Zungenpfeife verstanden werden. Das Theorem von Fourier scheint ihm, ebenso wie das Phänomen der Obertöne, unbekannt. Helmholtz' Bestimmung der Formanten bei natürlichen Vokalen mit Resonatoren und ihre Deutung vor dem Hintergrund des Ohmschen Gesetzes und des Theorems von Fourier erfolgt gegen Ende der 50-er Jahre.

Vocallaute sind eine von der Tonhöhe und dem Klang (quality) ganz verschiedene Modificationen des Schalls, die man sorgfältig von den beiden letzteren unterscheiden muß. Unter Klang (Quality) verstehe ich die Eigenthümlichkeit des Schalls, durch welche wir den Ton einer Violine sogleich von dem einer Trompete unterscheiden. So sagen wir, eine Person habe eine klare, eine näseltnde, oder eine rauhe Stimme, und doch sind deren Vocallaute ganz verschieden voneinander.

Umgekehrt können, was die Höhe betrifft, alle Vocallaute durch die ganze Tonleiter hindurch gesungen werden. [Willis 1832, 401]

Die Bemerkung, dass die Vokallaute durch die ganze Tonleiter gesungen werden können, wird im gleichen Aufsatz relativiert: Für jeden Vokal existiert eine Grenzhöhe, oberhalb welcher er nicht mehr hervorgebracht werden kann [Willis 1832, 407-408]. Wesentlich in obigem Zitat ist, dass die Identität des Vokals nicht an eine feste Höhe des Grundtons

gebunden ist. Das heisst verschieden hohe Töne können den gleichen Vokal darstellen, und ebenso können verschiedene Vokale auf der gleichen Tonhöhe gesungen werden. Ferner setzt die Formulierung „den Ton einer Violine sogleich von dem einer Trompete unterscheiden“ – im Unterschied zu Helmholtz – nicht voraus, dass die beiden Instrumente den gleichen Ton spielen. Das Eigentümliche eines Klangs offenbart sich als Differenz zu einem anderen Klang. Das Fehlen der Zusatzvoraussetzung „bei gleicher Tonhöhe“ geht davon aus, dass Töne verschiedener Tonhöhe (und Lautstärke) bezüglich Klangfarbe prinzipiell vergleichbar sind.

Bemerkenswert ist die Unterscheidung der Vokalqualität als *nicht* klangfarblich. *Klar*, *näselnd* und *rauh* gehören zu den eigentlichen klangqualitätsbestimmenden Merkmalen, während die Vokallaute davon unabhängig sind, denn sie können mit den ersteren beliebig kombiniert auftreten. Sie bedeuten eine davon unabhängige Dimension [vgl. Kap. 5.9 und Kap. 7.6]. Die folgende Bemerkung verweist auf einen Zusammenhang zwischen der Dauer und der Erkennbarkeit der Vokale:

..., daß die Verschiedenheit der Vocale gänzlich auf dem Contrast beruht, und daß sie daher am besten zu unterscheiden sind, wenn man rasch von einem zum andern übergeht, nicht wenn man einen derselben längere Zeit hindurch anhält. [...] daß es selbst beim Singen, wenn man einen Vocallaut lange anhält, bald unmöglich wird zu unterscheiden, welcher er sei. [Willis 1832, 400-401]

Man könnte demzufolge vermuten, dass für Willis das Erkennen der Vokale weniger im stationären Anteil eines Tons als in seinem Einschwingvorgang begründet ist. Diese Vermutung wird aber im Verlauf des Artikels nicht weiter gestützt. Die Argumentation ist viel eher die: hat man das *e* eines bestimmten Sprechers als Vergleichsmuster noch im Gedächtnis, so ist sein *i* leichter davon abzugrenzen. Die Vokalerkennung ist kontextabhängig. Diese Vermutung wird von der modernen Phonetik gestützt [vgl. Mol 1970, 62-71].

Der einzige Willis bekannte bisherige physikalische Erklärungsansatz für die qualitativen Verschiedenheiten des Klangs stamme von Euler [vgl. Kap. 3.3.4]:

Euler hat diese Modificationen der Töne wohl unterschieden. Nach ihm hängt die *Höhe* von der Zahl der Schwingungen in gegebener Zeit ab, und die *Stärke* von der Größe des Schwingungsbogens. Der *Klang* und der *Vocallaut* müssen dagegen, wie er meint, durch die Form der Kurven, die das Gesetz der Dichtigkeit und der Schnelligkeit in dem Impulse ausdrücken, bedingt werden; doch stellt er diese Ansicht nur als eine, der Erfahrung noch entbehrende Vermuthung hin. In Betreff der Eigenthümlichkeit des Tons, vermöge welcher wir sogleich wissen, ob wir eine Geige oder Trompete hören, bemerkt er, daß, da die Vibrationen auf jedem Instrumente in anderer Weise erregt werden, die Pulsationen derselben auch besondere Condensations- und Bewegungsgesetze befolgen müßten, und dadurch, meint er, würden die Töne charakterisirt. [Willis 1832, 401]

Mit der „Form der Kurven, die das Gesetz der Dichtigkeit und der Schnelligkeit in dem Impulse ausdrücken“ sind die Veränderung des Luftdrucks und der kinetischen Energie in Abhängigkeit von der Zeit gemeint.

[Verweis auf: Leonhard Euler, De motu aëris in tubis. Schol. II, III Prop. 73. Nov. Comm. Petrop. XVI / Mém. Acad. Berlin 1767, p. 354 / Schol. II Prop. 80]

Willis vergleicht die *Sprachwerkzeuge* in ihrer *Construction* mit *Zungenpfeifen*:

Der allgemeinen Annahme nach sind die Sprachwerkzeuge in ihrer Construction in sofern den Zungenpfeifen ähnlich, als der Ton durch einen schwingenden Apparat im Kehlkopf hervorgebracht

wird, und dieser Ton, dessen Höhe von der Zahl der Schwingungen dieses Apparats in gegebener Zeit abhängt, wird dann in seinem Klange abgeändert durch die Mund und Nasenhöhle, die der Röhre entsprechen, welche die Orgelbauer zu ähnlichen Zwecken an das Mundstück der Zungenpfeife setzen. [Willis 1832, 402]

Vergleichend seien zwei diesbezüglich relevante Textstellen aus Michael Dickreiter, *Musikinstrumente*, 1994 angegeben:

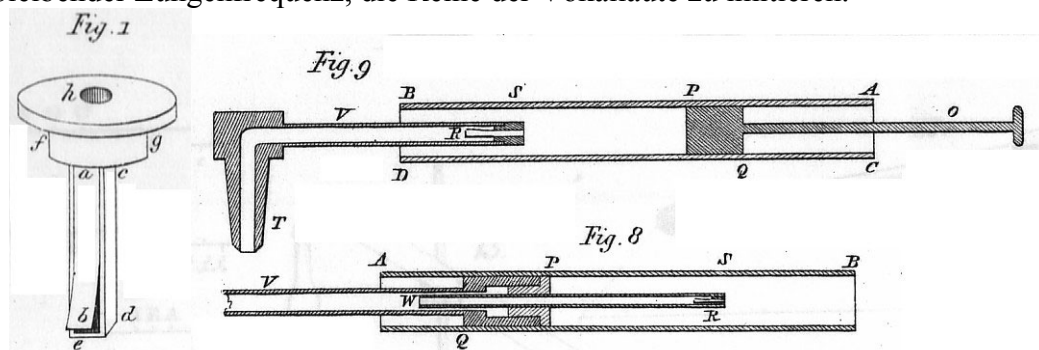
Die Tonerzeugung der Zungenpfeifen entspricht etwa derjenigen der Klarinetten. Allerdings ist die schwingende Zunge aus Metall und bestimmt mit ihrer Resonanz die Tonhöhe. Das Resonanzrohr beeinflusst nur die Klangfarbe. [Dickreiter 1994, 169]

Im Allgemeinen erzeuge

[...] der eigentliche Schwingungserzeuger bei Musikinstrumenten nicht den Klang [...], den das Instrument schliesslich abstrahlt [...]. Immer war es ein klangveredelndes Resonanzsystem, das die erzeugte Schwingung entscheidend verändert hat. Bei der menschlichen Stimme wird diese Tatsache besonders wichtig für die Klangbildung..

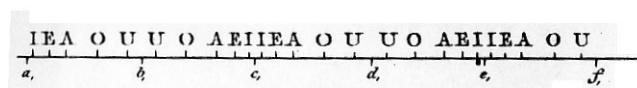
Die Stimmlippen, die eigentlichen Schwingungserzeuger, stellt man sich am besten wie die schwingenden Lippen eines Blechbläfers vor [...], die den Luftstrom aus den Lungen in kleinen Stößen passieren lassen. Die Schwingung ist sehr teiltonreich und kann vom Sänger modifiziert werden. [Dickreiter 1994, 203]

Die Vokalformanten sind als Resonanzen der verschiedenen Hohlräume im Kopf zu deuten. Durch ausziehbare Resonanzröhren gelingt es Willis, bei konstanter Tonhöhe, das heisst bei gleichbleibender Zungenfrequenz, die Reihe der Vokallaute zu imitieren.



[Willis 1832, Tafel IV, Fig. 1, 8, 9]

Da die Länge der Resonanzröhre ihre stärkste Eigenfrequenz bestimmt, führen Willis Versuche – aus einer spektralen Perspektive – zwangsläufig zu einer Formanttheorie der Vokale: Der Vokalcharakter ist durch die absolute Frequenz der am stärksten hervortretenden Teiltöne bestimmt. Willis versteht die Vokalklangfarbe als von einem einzigen Formanten abhängig. Seine Theorie basiert auf durch Schallsynthese gewonnener Erkenntnis. Wie bereits erwähnt macht sie keinen Gebrauch von den trigonometrischen Reihen des Theorems von Fourier. Da die Vokale durch eine einzige Frequenzregion bestimmt sind, können sie in Funktion der Pfeifenlänge als lineare Abfolge aufgezeichnet werden.



Vokalreihen an einer halboffenen ausziehbaren Zungenpfeife. Die Vokalreihe wird in Abhängigkeit von der jeweils am stärksten angeregten Teiltonnummer abwechselnd in auf- und absteigender Folge durchlaufen [Willis 1832, Tafel IV, 2]

Aus Sicht der Fourierzerlegung ist der starke Obertongehalt der Stimmlippen- bzw. Zungenschwingung Voraussetzung dafür, dass die Klangfarbe durch die Gestalt des Resonanzraums beeinflussbar ist. (Dies gilt auch für die Tonerzeugung bei Rohrblatt- und Streichinstrumenten.)

Die schwingende Zunge wird eine Reihe gleich starker, durch gleiche Zeiträume getrennter, aber abwechselnd verdichteter und verdünnter Pulsationen hervorbringen, welche wir Primärpulsationen nennen können.

Andererseits wird jedem derselben eine Reihe sekundärer Pulsationen von abnehmender Stärke folgen, die von den respectiven Primärpulsationen ebenfalls durch gleiche, aber von der Länge der angesetzten Röhre regulierte Zeiträume getrennt werden. [...]

Betrachten wir nun zuvörderst den Fall, daß die Abstände zwischen den sekundären Impulsen kleiner seyen, als die zwischen den primären [...]. [Willis 1832, 412]

Unter *Primärpulsationen* versteht Willis die Schwingung der Zunge, sie bestimmen die Grundfrequenz des erzeugten Tons.

Die *Sekundärpulsationen* ergeben sich dadurch, dass jede durch die Zunge erzeugte Pulsation, als eine in der Pfeife hin- und herlaufende Störung angesehen werden kann. Die Zeit, die die Störung benötigt um an den Ort ihrer Erzeugung zurückzukehren, ist von der Länge der Pfeife, das heisst ihrer tiefsten Eigenfrequenz abhängig. Je nach dem Verhältnis zwischen Zungen- und Pfeifenfrequenz entsteht durch Interferenz eine verschieden starke Rückwirkung der Sekundärpulsation auf die Zungenbewegung: Falls die Zungenfrequenz durch diese Rückkoppelung nicht wesentlich beeinflusst wird, treten im Fourierspektrum die Partialtöne des Gesamtsignals in unmittelbarer Nähe zur Sekundärfrequenz besonders deutlich in Erscheinung, es kommt dann zu einem Formanten im Resonanzbereich der Röhre. Bei der Verwendung einer Zunge mit anderer Eigenfrequenz bleibt diese Zone verstärkter Aktivität erhalten: der Vokaltyp bleibt gemäss Formanttheorie der gleiche, aber mit verschiedener Tonhöhe.

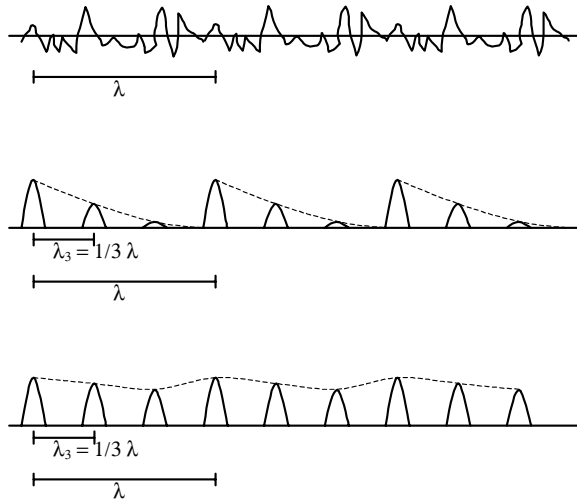
In ähnlicher Weise können die Vokale auch mit einer Metallfeder über einem drehenden Zahnrad synthetisiert werden (Savart, Robinson) – die Eigenfrequenzen der Feder bestimmen dabei den Vokaltyp und die Drehgeschwindigkeit des Zahnrades die Grundfrequenz [Willis 1832, 417].

Willis interpretiert die Wirkung der derart zusammengesetzten Tonerzeugung wie folgt:

Untersuchen wir die Natur unserer Reihen, so finden wir, daß sie nur aus der Wiederholung eines musikalischen Tons in solcher raschen Folge besteht, daß daraus ein anderer Ton entspringt. Es ist jedoch längst bekannt, daß wenn irgend ein Geräusch in gleichen Abständen und mit gehöriger Schnelligkeit wiederholt wird, ein musikalischer Ton entsteht. Ist z. B. *g''* der Ton einer offenen Röhre, und *c'* der Ton einer Zunge (d. h. macht sie 512 Schläge in der Secunde), dann besteht die vereinte Wirkung beider in einer Wiederholung des Tons *g''* in gleichen Abständen 512 Mal in einer Secunde, und daraus entspringt der Ton *c'*; in diesem Fall bringt *g''* dieselbe Wirkung hervor, wie irgend ein anderes Geräusch. [Willis 1832, 414]

„dieselbe Wirkung [...] wie irgend ein anderes Geräusch“: Anstelle eines periodisch wiederholten Geräuschs, wird der schnell abklingende Ton *g''* zur Eigenfrequenz der Pfeife

periodisch wiederholt. Die Grundfrequenzwahrnehmung ist dadurch nicht beeinträchtigt. Das Fourierspektrum eines solchen zusammengesetzten Signals enthält eine Komponente zur Tonhöhe g'' . Klingt dieses g'' nicht genügend rasch ab, so tritt die Grundfrequenzkomponente c' im Spektrum gegenüber dem dritten Teilton stark in den Hintergrund.



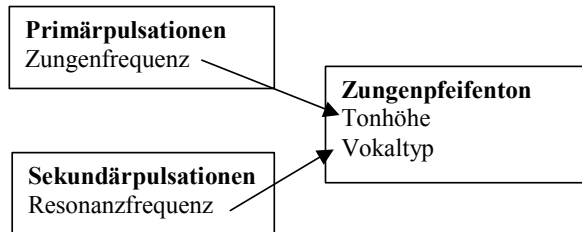
Die oberste Zeitfunktion zeigt ein beliebiges λ -periodisches Signal (mit mehreren Durchgängen durch die Nullage pro Periode), die zweite Funktion illustriert die stark gedämpften Sekundärpulsationen zur Duodezime entsprechend der Modellierung von Willis, die unterste Funktion mit schwach gedämpften Sekundärpulsationen zeigt im eingeschwungenen Zustand ein starkes Zurücktreten der Grundfrequenz im Fourierspektrum, da die gestrichelt gezeichnete Hüllkurve innerhalb einer Periode nur wenig schwankt.

Die Tonhöhe der Sekundärpulsationen, die tiefste Eigenfrequenz der Pfeife, bestimmt den *Vocallaut*, die Tonhöhe des betreffenden gesungenen Vokals ist davon unabhängig.

Die Erfahrung zeigt, daß die entstehenden Töne durch die Eigenschaft, welche wir Vocallaut nennen, charakterisiert werden, und überdieß lehrt sie uns nicht nur, daß diese Töne in ihrer Höhe immer dem Ton der Zunge oder der Primärpulsationen gleich kommen, sondern auch, daß der erzeugte Vocallaut für gleichen Werth von s [die Länge der Pfeife bzw. ihre tiefste Eigenfrequenz dm] immer derselbe ist. So z. B. ist in dem angeführten Beispiel g'' der Ton, welcher dem Vocal A° entspricht (Taf. 1); wenn dieser Ton 512 Mal in einer Secunde wiederholt wird, so erhält man die Tonhöhe c' , und den Vocal A° ; wenn er mittelst einer andern Zunge, die an dieselbe Röhre gesetzt worden ist, 340 Mal in einer Secunde wiederholt wird, so bekommt er die Höhe f , aber der Vocallaut ist noch A° . Hieraus erhellt, daß das Ohr, wenn es auch die Wahrnehmung für die Höhe von s verliert, doch die Identität noch durch den Vocallaut hören kann. Dieser Vocallaut läßt sich indeß bis zu einem gewissen Grade an einfachen *) musicalischen Tönen wahrnehmen. Die hohen Töne der Orgel oder Geige geben offenbar ein I an, die Baßöne ein U , und wenn man schnell die ganze Tonreihe hinauf und hinab durchläuft, glaubt man die Reihe $U, O, A, E, I, I, E, A, O, U$ u. s. w. zu hören, so daß es den Anschein hat, als sey in einfachen Tönen ein jeder Vocallaut unzertrennlich von einer gewissen Tonhöhe **), und als werde in einem kombinierten System von Impulsen, obgleich ihre Höhe verloren geht, ihr Vocallaut verstärkt.

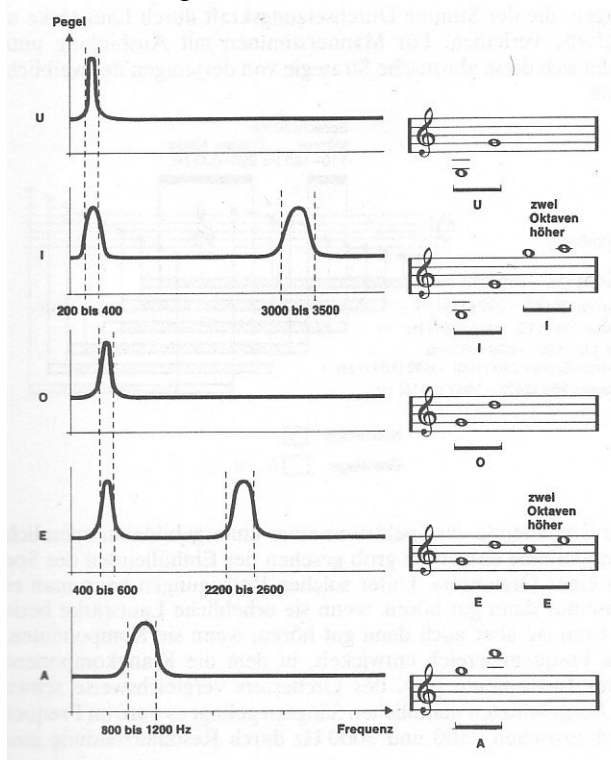
*) Einfache Töne nennt der Verfasser solche, die durch Schwingungen eines einzigen Körpers entstehen, z. B. die Töne der Labialpfeifen, die nur durch Schwingungen der Luft hervorgebracht werden. P .

****)** Kempelen macht hierüber eine sonderbare Bemerkung. Er sagt §. 110: „*Il me semble que lorsque je prononce des voyelles différentes sur le même ton, elles ont pourtant quelque chose qui donne de change à mon oreille, et me fait penser qu'il y a une certaine mélodie, qui cependant, comme je le sais très-bien ne peut-être produite que par la variation des tons en aigues et en graves ...*” [Willis 1832, 414-415]



Die Schwierigkeit für Willis besteht, um mit Ohm zu sprechen, darin, dass er die den Vokaltyp bestimmende Resonanzfrequenz nicht „als reellen Bestandtheil“ des Zungenpfeifentons nachweisen kann. Das heisst, das Vorhandensein eines Teiltons im Pfeifenton mit einer den Sekundärpulsationen entsprechenden Tonhöhe. Ein solcher Nachweis bedingt zugleich, wenn er mit Hilfe des Satzes von Fourier geführt wird, dass die Sinusschwingung als Ton schlechthin anerkannt wird, das heisst die Gültigkeit des Ohmschen Gesetzes.

Vergleichend dazu eine moderne Darstellung einiger deutscher Vokale, die tiefsten Vokalformanten entsprechen der Tonhöhe der Sekundärpulsationen:



[Quelle: Dickreiter 1994, 203]

Die Abbildung zeigt, dass die deutschen Vokallaute *o* und *e* durch eine einzige Formantfrequenz nicht unterschieden werden können. Eine zweidimensionale Veranschaulichung der Vokale ist demnach sinnvoll [vgl. Mol 1970, 66].

Helmholtz, der Willis' Formantbestimmung mit der eigenen vergleicht, widerspricht nicht der physikalischen Analyse der Töne der Zungenpfeifen, sie gebe aber

nur die Art und Weise an, wie die Bewegung in der Luft geschieht, und nicht die entsprechende Reaction des Ohres gegen diese Bewegung [Helmholtz 1863, 180]

Mit „Reaction des Ohres“ ist die Zerlegung der betreffenden Luftbewegung in ihre Fourierkomponenten „nach den Gesetzen des Mittönens“ [Helmholtz 1863, 180] gemeint. Helmholtz selbst charakterisiert die Vokale *ä, e, i, ö* und *ü* durch zwei Formanten in Übereinstimmung mit obiger Darstellung, und er erklärt dies dadurch, dass die menschliche Spracherzeugung als doppeltes Resonanzsystem anzusehen ist.

Die Fussnoten im obigen Willis-Zitat sind aufschlussreich hinsichtlich des Obertonphänomens. Die *einfachen Töne* sind über ihre Erzeugung durch einen einzigen klingenden Körper definiert. Auch wenn diese wie bei den Labialpfeifen Obertöne haben können, gelten sie als einfach. Die Zungenpfeifentöne sind demgegenüber nicht einfach, da sie durch Zusammenwirkung von Zunge und Resonanzkörper verursacht werden. Die erste Fussnote stammt möglicherweise vom Übersetzer oder Herausgeber. Die nicht weiter kommentierte Wiedergabe des Kempelen-Zitats zeigt, dass sowohl Kempelen als auch Willis nicht mit dem Obertönen vertraut sind. Willis liefert aber mit seiner Analyse der Töne der Zungenpfeifen die Grundlage für ihren Nachweis im Fourierspektrum und setzt damit gleichzeitig den Grundstein der modernen Vokalformantentheorie.

4.4. Klangfarbe – Tonfarbe

Die Verbindung von Farbe und Klang beziehungsweise von Ton und Klang zur Bezeichnung eines Qualitätsaspekts der Töne scheint in neuerer Zeit vom deutschen Sprachraum auszugehen. Der Gebrauch von *chroma* bei Aristoteles in derselben Bedeutung, wie Gage [1997, 227] behauptet scheint mir ungesichert. Aufschluss über die Bedeutungen von Fachtermini kann ihre Übersetzung in andere Sprachen insbesondere bei Neologismen (Klangfarbe) oder bei Erweiterung der Spezialbedeutung eines bestehenden Begriffs geben. Chladni behauptet das Fehlen eines zu *timbre* synonymen Begriffs im Deutschen. Der Begriff Tonfarbe wäre bei ihm sinnlos, da die Sinusschwingung neben der lautstärkedeterminierenden Amplitude keine weiteren Eigenschaften hat. Da für ihn die Gleichzeitigkeit mehrerer Töne naturgemäss eine Vielheit darstellt, kann es für ihn auch keine spektrale Theorie der Klänge geben.

Bei Wackenroder findet sich eine Korrespondenz zwischen Klangfarbe und Farbe, ohne dass er entsprechende Komposita verwendet. Die bereits diskutierte Stelle bei Herder 1768, die das Kompositum Tonfarbe (erstmalig ?) verwendet [Kap. 3.3.5], lässt nicht genau erkennen, damit das Gleiche gemeint ist wie bei Praetorius, wenn dieser von *Resonantz* spricht. Berlioz verwendet den Begriff *timbre* relativ häufig, in der Regel pro Instrument mit bestimmbarer Tonhöhe einmal. Die erste autorisierte deutsche Übersetzung von 1864 macht aber vom Begriff *Klangfarbe*, der 1835 bereits lexikalisch dokumentiert ist, kaum Gebrauch. Offenbar setzt sich der Begriff Klangfarbe erst mit Helmholtz und Brandt als wissenschaftlicher, deutscher Fachbegriff durch. Bezüglich der Übersetzungsproblematik aufschlussreich ist auch die erste englische Ausgabe von Helmholtz' *Lehre von den*

Tonempfindungen. Der Übersetzer Ellis [1954] weist auf die Schwierigkeit der Übertragung des Begriffs der Klangfarbe hin:

I can find no valid reason for supplanting the time-honoured expression *quality of tone*. Prof. Tyndall quotes Dr. Young to the effect that 'this quality of sound is sometimes called its register, colour, or timbre.' *Register* has a distinct meaning in vocal music which must not be disturbed. *Timbre*, properly a kettledrum, then a helmet, then the coat of arms surmounted with a helmet, then the official stamp bearing that coat of arms (now used in France for a postage label), and then the mark which declared a thing to be what it pretends to be, Brun's 'Guinea's stamp', is a foreign word, often odiously mispronounced, and not worth preserving. *Colour* I have never met with as applied to music, except at most as a passing metaphorical expression. But the difference of tones in *quality* is familiar to our language. [Helmholtz, H. (1877). *On the Sensations of Tone as a Physiological Basis for the Theory of Music*. 2nd English edition to conform to 4th German edition of 1877. Trans. Alexander Ellis, Dover Publications, 1962 p. 24, footnote, zitiert nach: <http://sparky.ls.luc.edu/sandell/sharc/timbredef.html>]

Tyndall (1820-1893) zufolge wäre *color* bei Young in diesem Sinne nachweisbar. In Youngs Untersuchung zu Schall und Licht [Young 1800] lässt sich allerdings kein solcher Wortgebrauch auffinden.

E.T.A. Hoffmann gebraucht in der Kreisleriana den Begriff *Kolorit* 1802, nachdem er die „harmonische Struktur, und ein danach richtig ausgearbeiteter Satz“ welche die Regeln des Kontrapunkts befolgen, mit der „nach bestimmten Regeln des Verhältnisses richtig entworfene[n] Zeichnung des Malers“ gleichsetzt:

Aber bei dem Kolorit ist der Musiker ganz verlassen; denn das ist die Instrumentierung. – schon der unermesslichen Varietät musikalischer Sätze wegen ist es unmöglich, hier nur eine Regel zu wagen, aber auf eine lebendige durch Erfahrung geläuterte Fantasie gestützt, kann man wohl Andeutungen geben, und diese zyklisch gefasst würde ich: Mystik der Instrumente nennen. Die Kunst, gehörigen Orts bald mit dem vollen Orchester, bald mit einzelnen Instrumenten zu wirken, ist die musikalische Perspektive; ... [Zitiert nach Maehder, 1978, 21]

Jürgen Maehder schreibt dazu: „Im Gegensatz aber zu den späteren Regelsystemen der Instrumentationslehren betonte Hoffmann gerade die Tatsache, dass dieser Bereich der Musik durch Theorie nicht einholbar sei“ [Maehder 1978, 21]. Die „möglichen Andeutungen“ zu einer „Mystik der Instrumente“ könnten aber auch als Ansätze zu einer induktiv gewonnenen nicht a prioriischen Handwerkslehre gedeutet werden, bei der die Zuordnung bestimmter Instrumente zu poetischen Chiffren in ihrer Historizität mit einbezogen ist.

Christian Friedrich Michaelis, Sprachrohr für Kants ästhetische Auffassungen in der Allgemeinen Musikalischen Zeitung, vergleicht gemäss Lichtenhahn [1983b, 382] wiederholt die Musik mit der Malerei und setzt dabei die musikalische Form mit der Zeichnung und den Klang mit der Farbe gleich. Er schreibt 1805/06, dass die Saiteninstrumente

[...] sobald ihr Ton den Blasinstrumenten nicht zu sehr ähnelt, die bloße Form der Musik gleichsam nach ihren Umrissen reiner zeichnen [...]

als die Blasinstrumenten, die

[...] bunte Farben auf die musikalische Komposition [...] [Christian Friedrich Michaelis, Einige Bemerkungen über den Missbrauch der Blasinstrumente, AMZ 1805/06, 98, zitiert nach Lichtenhahn 1983b, 382]

auftragen. Der Streicherklang wäre demnach farblich weniger aufdringlich und läuft weniger Gefahr, die in ihrer Zeichnung festgehaltene Formstruktur der Musik zu verbergen.

Die Verwendung von *coloris* und *coloriser* lässt sich bei Berlioz vereinzelt und unkommentiert nachweisen. Der Gebrauch von *couleur* in diesem Sinne ist vor dem Hintergrund des heftig diskutierten Farbenklaviers des Père Castel im 18. Jahrhundert wohl in Frankreich undenkbar, findet sich doch kaum eine positive Würdigung von Castels Ansinnen. Auch Koch steht dem Farbenklavier mit Referenz auf Mitzler ablehnend gegenüber.

Das unbekannte Lexikon von Andersch [1829] fällt in eine Zeit, in der sich Klangfarbe bei Gottfried Weber bereits nachweisen lässt. Die Klangfarbe taucht darin nicht auf.

Die Korrespondenz zwischen Ton und Farbe steht nicht im Brennpunkt dieser Arbeit [vgl. hierzu Jewansky 1999], ein Blick auf Helmholtz' Darstellung der Problematik und auf seine Geometrie der Farben ist aber lohnenswert, vor allem auch hinsichtlich räumlicher Modelle der Klangfarben, wie sie sich im Anschluss an Schönbergs Utopie der Klangfarbenmelodie um den Begriff des *timbre space* ansammeln [vgl. auch Kap. 7].

4.4.1. Wackenroder (1799)

Wackenroders Kritik am Farbenklavier verweist auf eine Auffassung, der, im Unterschied zu den meisten Korrespondenztheorien, eine Korrespondenz zwischen Farbe und Klangqualität zugrundeliegt. Wackenroder leugnet nicht eine Korrespondenz zwischen Tönen und Farben. Das Farbenklavier misslingt aber wegen der falschen Gleichsetzung von Tonhöhen und Farben:

Jeder einzelne Ton eines besondern Instrumentes ist wie die Nuance einer Farbe, und so wie jede Farbe eine Hauptfarbe hat, so hat auch jedes Instrument einen einzigen, ganz eigentümlichen Ton, der es am meisten und besten ausdrückt. Es war eine unglückliche Idee, ein Farbenklavier zu bauen, und zu glauben, daß das kindische Spielwerk nur irgendeine angenehme Wirkung hervorbringen könne, gleich den mannigfaltigen Tönen eines Instrumentes. Es konnte nichts weiter erfolgen, als wenn auf mehreren Blas- oder Saiteninstrumenten hintereinander dieselben Töne angegeben würden; denn der Ton ist der Farbe, die Melodie und der Gang des komponierten Stückes der Zeichnung und Zusammensetzung zu vergleichen. Die Musiktöne gleichen oft einem feinen flüssigen Elemente, einem klaren, spiegelhellen Bache, wo das Auge sogar oft in den schimmernden Tönen wahrzunehmen glaubt, wie sich reizende, ätherische und erhabene Gestalten eben zusammenfügen wollen, wie sie sich von unten auf emporarbeiten, und klarer und immer klarer in den fließenden Tönen werden. Aber die Musik hat eben daran ihre rechte Freude, daß sie nichts zur wahren Wirklichkeit gelangen läßt, denn mit einem hellen Klange zerspringt dann alles wieder, und neue Schöpfungen sind in der Zubereitung. [Wackenroder: Phantasien über die Kunst für Freunde der Kunst, S. 152-153. Digitale Bibliothek Band 1: Deutsche Literatur, S. 167979-167979 (vgl. Wackenroder-WuB, S. 346)]

In „Jeder einzelne Ton eines besondern Instrumentes“, in „ganz eigentümlichen Ton“ und in „hintereinander dieselben Töne angeben“ wird *Ton* mit dreierlei verschiedenen Bedeutungsnuancen verwendet: Ton als kleinste Einheit der musikalischen Syntax, Ton als Klangfarbe (wie bei Sulzer) und Ton als Tonhöhe.

Das verbindende der verschiedenen Töne des gleichen Instruments ist ihre Farbe. Der Einzelton bringt je nach Tonhöhe eine andere Farbnuance dieser Hauptfarbe zum Ausdruck. Die Variation der Farbe in Form von aufeinanderfolgenden, farbigen Lichtern ist nicht das Pendant zu einer Melodie, sondern nur die Variation der Instrumentierung eines

Unisonoklanges und daher uninteressant. Schönbergs Orchesterstück „Farben“ op. 16.3, setzt diesen gemäss Wackenroder unfruchtbaren Ansatz in Tat um ...

Die menschliche Kunst trennt Skulptur, Malerei und Musik, jede besteht für sich, und wandelt ihren Weg. Aber immer ist es mir vorgekommen, als wenn die Musik für sich in einer abgeschlossenen Welt leben könnte, nicht aber so die Malerei: **zu jeder schönen Darstellung mit Farben gibt es gewiß ein verbrüderes Tonstück, das mit dem Gemälde gemeinschaftlich nur eine Seele hat.** Wenn dann die Melodie erklingt, so zucken gewiß noch neue Lebensstrahlen in dem Bilde auf, eine gewaltigere Kunst spricht uns aus der Leinwand an, und **Ton und Linie und Farbe dringen ineinander, und vermischen sich mit inbrünstiger Freundschaft in eins.** Dann hätten wir wohl die Kunst als Gegenstück zur Natur, als höchst verschönerte Natur, von unserer reinsten und höchsten Empfindung eingefafßt, vor uns. Darum geschieht es wohl, daß in Kirchen zuweilen selbst unbedeutende Bilder so wundersam in uns hineinsprechen, und wie mit einer lebendigen Seele zu uns hinatmen, **verwandte Töne verscheuchen den toten Stillstand, und erregen in allen Linien und Farbenpunkten ein Gewimmel von Leben.** Die Skulptur will nur die Formen ausdrücken, sie verschmäht Farbe und Sprache, sie ist zu idealisch, um etwas mehr zu wollen, als sie selber ist. Die Musik ist der letzte Geisterhauch, das feinste Element, aus dem die verborgensten Seelenräume, wie aus einem unsichtbaren Bache ihre Nahrung ziehn; [Wackenroder: Phantasien über die Kunst für Freunde der Kunst, S. 75-76. Digitale Bibliothek Band 1: Deutsche Literatur, S. 167901 (vgl. Wackenroder-WuB, S. 297-298)]

Sogar eine einzelne Blume in der Natur, ein einzelnes abgerissenes Blumenblatt kann uns entzücken. Es ist nicht sonderbar, daß wir an der **bloßen Farbe ein Wohlgefallen** äußern. In **den abgesonderten Farben** sprechen die verschiedenen Naturgeister, wie die Himmelsgeister in **den verschiedenen Tönen der Instrumente.** Wir können nicht aussprechen, wie uns jede Farbe bewegt und rührt, denn die Farben selber sprechen in zarterer Mundart zu uns: Es ist der Weltgeist, der sich daran freut, sich auf tausend Wegen zu verstehn zu geben und doch zugleich zu verbergen; die **abgesonderten Farben** sind seine **einzelnen Laute**, wir horchen aufmerksam darauf hin, wir merken wohl, daß wir etwas vernehmen, doch können wir keinem andern, uns selber nicht Kunde davon bringen; aber eine geheime magische Freude durchströmt uns, wir glauben uns selbst zu erkennen, und uns einer alten, unendlich seligen Geisterfreundschaft zu erinnern. [Wackenroder: Phantasien über die Kunst für Freunde der Kunst, S. 77-78. Digitale Bibliothek Band 1: Deutsche Literatur, S. 167903-167904 (vgl. Wackenroder-WuB, S. 299)]

4.4.2. Koch

Auch Koch [1802] diskutiert das Farbenklavier von Castel und kommt zu einer negativen Einschätzung:

Farbenclavier, Clavecin oculaire.

Der Jesuit Louis Bertrand Castel in Paris kam auf den Einfall mittelst des Wechsels und der Harmonie der Farben, die er nach einer gewissen Abstufung unter die Tasten eines Clavierinstrumentes verteilte, auf das Empfindungsvermögen ohngefähr auf die nämliche Art zu wirken, wie es in der Tonkunst mittelst der Harmonie der Töne geschieht. Nachdem er im Jahre 1725 diese Idee bekannt gemacht hatte, verfertigte er einige Jahre nachher ein Claviatur-Instrument, welches bei dem Niederdrucke der Tasten, die von ihm dafür bestimmten Farben zeigte, und zwar nach folgenden von ihm angenommenen Grundsätzen. [Es folgt ein ausführliches Mitzler-Zitat(1743)]

Weil die Farbe kein solches leidenschaftliches Ausdrucksmittel abgeben kann, wie der Ton, so ist leicht einzusehen, daß durch ein solches Farbenspiel die Absicht des Erfinders nicht erreicht werden konnte; daher man auch dies Erfindung nicht weiter zu benutzen gesucht hat. [Koch 1802, 555-557]

Die Einschätzung Koch von Farbe und Ton in Bezug auf die Leidenschaftlichkeit im Ausdruck ist mit derjenigen von Jean Paul verwandt [s.u.].

4.4.3. Jean Paul

... indes das *Feuer* und der *Ton* der Qualität nicht an die Ellen und in die Waage der Quantität zu bringen ist. [Vorschule der Ästhetik, 1804/13]

Ohne Anspruch darauf, der Vielschichtigkeit von Jean Pauls *Vorschule der Ästhetik* gerecht werden zu wollen, seien hier zwei Passagen herausgegriffen, die die Wesensbestimmung des Romantischen und Erhabenen anhand von Hören und Sehen angehen.

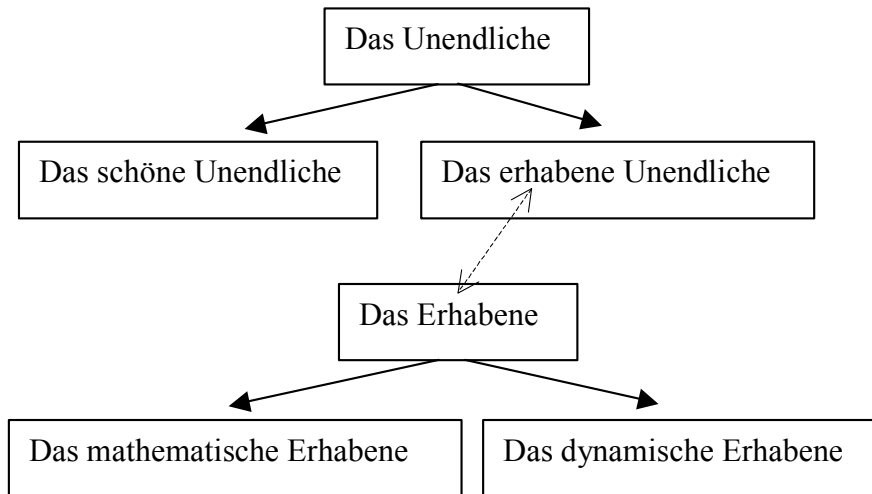
Das Romantische ist das Schöne ohne Begrenzung, oder das *schöne* Unendliche, so wie es ein *erhabenes* gibt. So ist Homer im angeführten Beispiel romantisch, indes er da, wo Ajax in der verfinsterten Schlacht um nichts weiter die Götter anflieht als um Licht, bloß erhaben ist. Es ist noch ähnlicher als ein Gleichnis, wenn man **das Romantische das wogende Aussummen einer Saite oder Glocke nennt, in welchem die Tonwoge wie in immer fernerer Weiten verschwimmt und endlich sich verliert in uns selber und, obwohl außen schon still, noch immer lautet**. Ebenso ist der Mondschein zugleich romantisches Bild und Beispiel. [Jean Paul 1813, 88]

Es ist für Jean Paul mehr als ein Gleichnis, wenn das Verklingen der einmalig angeschlagenen Saite oder Glocke für das Romantische schlechthin genommen wird. Das Verklingen eines durch eine einmalige Bewegung angestossenen klingenden Körpers wirkt als zunehmende räumliche Entfernung und Verinnerlichung. Im Sinne eines Erhaltungsgesetzes wird dabei äussere Energie des klingenden Körpers in innere Energie der Zuhörerschaft umgewandelt, wodurch dem romantischen Subjekt beim Nachhorchern die Erfahrung von Unendlichkeit oder zumindest einer Ahnung derselben in endlicher Zeit ermöglicht wird. Das Aussummen bedeutet physikalisch eine oszillierend asymptotische Annäherung des Hüllkurvenverlaufs an die Nulllage der äusserlichen Stille, und auch nach dem definitiven Unterschreiten der Wahrnehmungsschwelle lebt der zugehörige Klang innerlich weiter. Der Ton der Violine demgegenüber, der Zeit seines Erklings „farblich“ gestaltbar ist, eignet sich nicht als Träger einer so verstandenen romantischen Idee, denn ihr Ton lebt im Hier und Jetzt menschlicher Endlichkeit und stirbt, wenn die Spielerin keine Energie mehr in ihn hineinträgt. Der in seiner Zeitlichkeit und Diesseitigkeit gestaltete Ton der Violine gibt also zu keiner verinnerlichernde Unendlichkeitserfahrung Anlass. Zur Thematik des Verklingens bei Tieck/Wackenroder vgl. auch Maehder [1978, 11-13], und Ernst Lichtenhahn [1983 b, 384] schreibt in Bezug auf Amadeus Wendt und auf Hans Georg Nägelis Bevorzugung des Klaviers gegenüber Instrumenten mit gehaltenen Tönen: „mit dem Verklingen des Tones vollzieht sich gleichsam in jedem Augenblick des Musizierens die Entmaterialisierung, die der Verinnerlichung dient“, eine Deutung, die sich direkt auf obiges Jean Paul-Zitat anwenden lässt.

Die folgende Passage behauptet durch Beizug Kantscher Begriffe einen prinzipiellen Unterschied zwischen dem Hör- und dem Sehsinn.

Ferner teilt Kant **das Erhabene ins mathematische und ins dynamische** ein, oder wie Schiller es ausdrückt, in das, was unsere Faßungskraft übersteigt, und in das, welches unserer Lebenskraft droht. Man könnt' es kürzer **das quantitative und qualitative** nennen, oder **das äußere und das innere**. **Aber nie kann das Auge ein anderes als ein quantitatives Erhabene anschauen**; nur erst ein Schluß aus Erfahrungen, aber keine Anschauung kann einen Abgrund, ein stürmendes Meer, einen fliegenden Felsen zu einem dynamischen Erhabenen machen. Wie wird denn dieses aber angeschauet? **Akustisch; das Ohr ist der unmittelbare Gesandte der Kraft und des Schreckens**, man denke an den Donner der Wolken, der Meere der Wasserfälle, der Löwen etc. **Ohne alle Erfahrung wird ein Neuling von Mensch vor der hörbaren Größe zittern; aber jede sichtbare würde ihn nur heben und erweitern**. [Jean Paul 1813, 106]

Aus den beiden zitierten Passagen ergeben sich die folgende Unterteilungen:



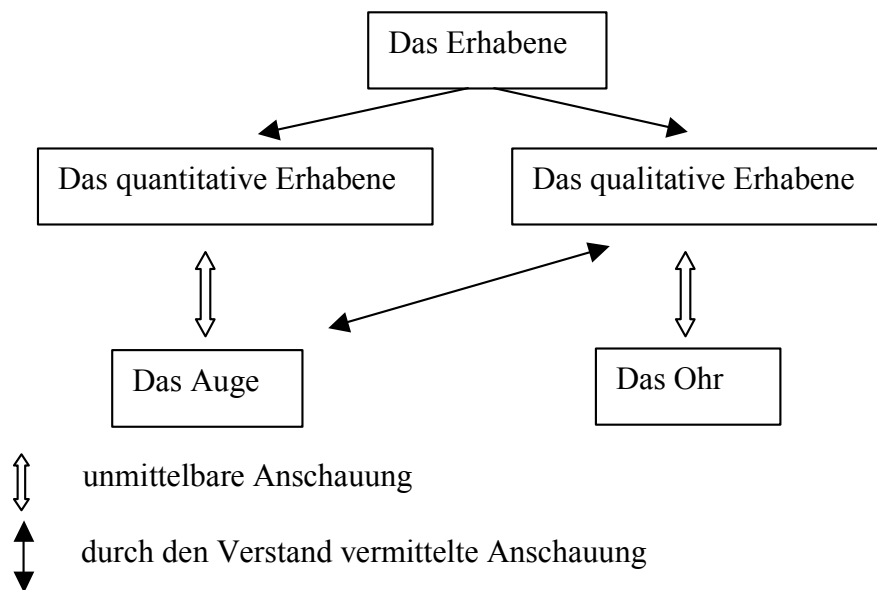
Das schöne Unendliche, das Romatische, geniesst einen höheren Stellenwert als das nur erhabene. *Schön* und *erhaben* scheinen sich nicht gegenseitig auszuschliessen. Hingegen zielt die sich an Kant orientierende Deutung des Erhabenen auf eine Dichotomie.

Diese präsentiert sich folgendermassen in tabellarischer Form:

Das Erhabene		
Kant	mathematisch	dynamisch
Schiller	die Fassungskraft übersteigend	der Lebenskraft drohend
Jean Paul	quantitativ	qualitativ
	äusseres	inneres

Die Gleichsetzung von *mathematisch* via Messbarkeit und *quantitativ* erinnert an eine schon von Praetorius angesprochene Vorstellung, wonach sich das Qualitative jeglicher Vermessung entzieht. Umgekehrt könnte also eine zunehmende Vermessung des Dynamischen durch die damit verbundene Grenzverschiebung die Existenz des Qualitativen bedrohen.

Das Auge hat im Unterschied zum Ohr keinen direkten Zugang zum dynamischen Erhabenen. Der „Neuling von Mensch“ erzittert vor „hörbarer Grösse“ ohne dazwischengeschaltete, durch den Verstand gebrochene Erfahrung. Das akustische Erschrecken ist in dieser Vorstellung universell erfahrbar.



Ob das Ohr auch einen direkten Zugang zum quantitativ Erhabenen hat, wird in der Textstelle nicht thematisiert, ist wohl stillschweigend mitgemeint. Zu denken ist etwa an das unbewusste Zählen der Seele beim Musikhören im Sinne von Mersenne und Leibniz, mithin die ganze auf Proportionenlehre gründenden Theorien der Tonsysteme und Konsonanzbestimmungen in ihrer gehörmässigen Erfassung. Allerdings ist dabei nicht aus den Augen zu verlieren, dass derartiges Zählen, seit der Entdeckung des Zusammenhangs zwischen Frequenz und Tonhöhe, ein Zählen in der Zeit ist, also immer bezogen auf einen dynamischen Aspekt der Hörwahrnehmung.

Anhand von Textstellen aus Jean Pauls Roman *Flegeljahre* [1804] lässt sich einerseits Jean Pauls poetische Umsetzung des Topos des Verklingens beispielhaft illustrieren, andererseits aber auch eine bemerkenswerte Personifizierung von Tönen und Farben in synästhetischem Kontext aufzeigen. Sie entsammen einer Traumschilderung Walts am Ende des Romans, die er seinem Bruder Vult „aufdrang“, kurz bevor dieser entflieht [527-531]:

Hoch oben im **stillen Blau** flog langsam eine **goldene** Biene **leise singend** einem Sternchen zu und sog an dessen weissen Blüten [...] bis wieder ungeheure Wolken, als reissende Tiere gestaltet, ankamen und am Himmel frassen. [...]

Ich sah nichts als ein glattes stilles Meer, aus diesem brach die *böse Feindin*, ohne eine **Welle** zu machen wie **Licht** durch **Glas** [...] ihr **Gesicht** war **meergrau** und doch jung, aber **voll kämpfender Farben** [...] Ehe ich antwortete, fuhr die böse Feindin fort: ‚Es war einmal ein ewiges Märchen, alt, grau, taub, blind, und das Märchen sehnte sich oft. [...]‘ Ehe ich antwortete, versetzte die böse Feindin: ‚Vernimm das alte **Widerhallen**; noch kein Wesen hat den Ton gehört, den es nachspricht. Wenn aber einst der Widerhall aufhört, so ist die **Zeit** vorbei, und die **Ewigkeit** kommt zurück und bringt den **Ton**; sobald alles sehr still ist, so werd' ich die drei Stummen hören, ja den Urstummen, der das älteste Märchen sich selber erzählt; aber er ist was er sich sagt. [...]‘ [528]

die **Blumen**, die **Sterne**, die **Töne**, die **Tauben** waren nur **schlummernde Kinder** gewesen [...] [530]

Goldgrüne Wölckchen regneten heiss übers Land, und **flüssiges Licht** tropfte überquellend aus Rosen- und Lilienkelchen. Ein **Strahl** aus einem Tautropfen schritt herüber durch mein düsteres Meer und **durchstach glühend das Herz** und sog darin, aber **das Tönen erfrischte es, daß es nicht welkte** [...] **einer der leisesten Töne kam und küsste eine Maiblume**, und ihr Glöckchen wurde heftig emporgeweht [529]

„Bleibe bei mir, mein Kind, wenn du von mir gehst“, sagte das bleibende [Kind]; da wurde das scheidende in der Ferne ein kleines **Abendrot**, dann ein **Abendsternchen**, dann tiefer ins Land hinein nur ein **Mondschimmer ohne Mond**, und endlich **verlor es sich ferner und ferner** in einen **Flöten-** oder **Philomelenton**.

Aber der **Morgenröte** gegenüber stand eine Morgenröte auf; immer herzerbebender **rauschten beide** wie Chöre **einander entgegen, mit Tönen statt Farben**, gleichsam als wenn unbekannte selige Wesen hinter der Erde ihre Freudenlieder herausfingen. [...]

Amor flog in Osten, **Psyche** flog in Westen auf, und sie fanden sich oben mitten im Himmel, und die **beiden Sonnen** gingen auf – **es waren nur zwei leise Töne, zwei an einander sterbende und erwachende**; sie tönten vielleicht: 'du und ich' zwei heilige, aber furchtbare, fast **aus der tiefsten Brust und Ewigkeit gezogene Laute**, als sage sich Gott das erste Wort und antworte sich das erste. Der Sterbliche durfte sie nicht hören, ohne zu sterben. [...] [530-531]

Um die Meinung zu Walts Traum befragt verlässt Vult mit der Bemerkung „Du sollst es gleich hören in dein Bett hinein“ Flöte spielend das Haus und der Roman schliesst so:

Noch aus der Gasse herauf **hörte** Walt entzückt **die entfliehenden Töne reden**, denn er merkte nicht dass mit ihnen sein Bruder entfliehe. [531] [Jean Paul, Flegeljahre 1804, fette Hervorhebungen: dm, zitiert nach insel taschenbuch 873, 1986]

Das durch mehrfache Metamorphose in einen sich verlierenden Flötenton verwandelte, scheidende Kind, erhält unmittelbar im Anschluss an den Traum seine reale Entsprechung im ebenfalls durch den Flötenton repräsentierten scheidenden Freund und Bruder. Es bleibt offen, ob sein verklingendes Entfernen für Walt in eine verinnerlichte Präsenz als Erfüllung der kindlichen Bitte „Bleibe bei mir, mein Kind, wenn du von mir gehst“ mündet.

Andreas Käuser und Winfried Eckel sprechen in der Aufsatzsammlung *Bildersturm und Bilderflut um 1800* [Schneider et al. (hg.), 2001] für die Zeit um 1800 von einer durch Herders „anthropologische Zeichentheorie“ [Käuser 2001, 239] angestossenen Ablösung des visuellen Paradigmas durch das akustische und einer durch das romantische Konzept der Synästhesie getragenen „Re-Visualisierung“, die zu einer Art „akustischer Anschaulichkeit“ führe [vgl. die Rezension von Sabine M. Schneider in in: sehpunkte 2 (2002), Nr. 11 [15.11.2002], www.sehpunkte.historicum.net/2002/11/3895282693.html]. Die Autoren beziehen sich dabei auf Wackenroder und Tieck, Jean Paul und E.T.A. Hoffmann. In Hoffmanns Musikerzählungen werde eine der anthropologischen Zeichentheorie genügende Relation „zwischen nonverbalen und sinnlichen Zeichenformen“ hergestellt, insbesondere zwischen „dem Klangphänomen und dem gestischen Körperausdruck. Diese Verkörperung des Klangs dient“ gemäss Käuser „sowohl der Semantisierung wie auch der Visualisierung der Musik“. [Käuser 2001, 238-239] Und Jean Paul schreibt in *Ueber die natürliche Magie der Einbildungskraft* in Zusammenhang mit der folgenden Textstelle von „ewigem Personifizieren“

Kurz, durch Physiognomik und Pathognomik *beseelen* wir erstlich alle Leiber – später alle unorganisierte Körper. Dem Baume, dem Kirchturme, dem Milchtopfe teilen wir eine ferne Menschenbildung zu und mit dieser den Geist [Jean Paul 1795, 204: zitiert nach Käuser 2001, 241]

4.4.4. Chladni und Gottfried Weber

Anlässlich der Übersetzung seiner Akustik ins Französische wurde Chladni auf terminologische Divergenzen der beiden Sprachen aufmerksam. Insbesondere konstatiert er das Fehlen einer deutschen Entsprechung zum französischen *timbre*:

Unter den Gegenständen des Hörens sind außer der Geschwindigkeit, mit welcher die Schwingungen geschehen, die mannigfaltigen Modificationen und Articulationen eines Schalles oder Klanges, (welche im Französischen *timbre* genannt werden), vorzüglich merkwürdig. [Chladni 1802, 295]

Und noch nach am Ende seines Lebens schreibt er in *Kurze Uebersicht der Schall- und Klanglehre, nebst einem Anhang, die Entwicklung und Anordnung der Tonverhältnisse betreffend*:

Von der qualitativen Verschiedenheit der Klänge (im Französischen *timbre*, wofür man wohl im Deutschen das Wort: Laut brauchen könnte) ist das Wesentliche noch unbekannt. [Chladni 1827b, 5-6]

Gottfried Weber verwendet den Begriff Klangfarbe aber bereits 1822:

Nur bei den Zungenpfeifen, Rohr- oder Zungenwerken der Orgel, scheint eher die Zunge als die Luftsäule, der eigentlich tonbestimmende Körper zu sein, der Pfeifenkörper hingegen mehr nur die Qualität des Klanges, seinen Charakter, sein eigenthümliches Gepräge, Timbre, die Tonfarbe (eigentlich Klangfarbe) zu modificiren, als dessen Quantität (Tonhöhe) unbedingt zu bestimmen. [Weber G. 1822, zitiert nach Jost 2001, 181]

Für Jost belegt die obige „Kette von Synonymen [...] sehr augenscheinlich die terminologische Unsicherheit zu dieser Zeit.“ [Jost 2001, 181] und er beantwortet die Frage

Warum bringt Weber ‚Tonfarbe‘ ins Spiel, wenn der eigentliche, mithin adäquate Begriff dafür ‚Klangfarbe‘ ist, zumal er nicht von der Qualität des Tones, sondern des Klanges ausgegangen ist, demnach also ‚Klangfarbe‘ viel näher als ‚Tonfarbe‘ liegt? [Jost 2001, 181]

damit, dass sich Weber schon 1817 mit dem Gegenstand beschäftigt hat, und dabei den Begriff *Tonfarbe*, nicht aber *Klangfarbe* in der gleichen Bedeutung gebraucht hat. [Jost 2001, 182] Jost scheint davon auszugehen, dass beide Begriffe durch Weber und etwa zeitgleich geprägt wurden [Jost 2001, 183]. Die Belegstelle bei Herder [vgl. Kap. 3.3.5] erlaubt eine andere Deutung. Da Tonfarbe bereits existiert, bleibt nur zu fragen, weshalb Weber ‚Klangfarbe‘ ins Spiel bringt. Der Grund dafür ist, dass er den – von ihm geprägten? – Begriff Klangfarbe für adäquater als die bereits in Gebrauch stehende Tonfarbe hält. Dass Klang und nicht Ton der geeignetere Wortsbestandteil ist, ergibt sich aus den meisten Texten im 18. und frühen 19. Jahrhundert. Denn der Ton – die Tonhöhe – ist eine quantifizierende, nicht weiter zerlegbare Eigenschaft eines Klanges. Diese Bedeutung lässt sich auch am obigem Weber-Zitat nachweisen, wo „tonbestimmend“ im Sinne von „tonhöhenbestimmend“ verwendet wird. Diese Unterscheidung von *Ton* und *Klang* gilt für den wissenschaftlichen, nicht aber für den allgemeinen und poetischen Sprachgebrauch, wo die beiden Ausdrücke im ausgehenden 18. Jahrhundert, so wie heute, zumeist austauschbar sind [vgl. Adelung³ 1811]. Die Einteilung in *quantitative* und *qualitative Merkmale* zeigte sich schon bei Praetorius und Mersenne, und sie zeigt sich in gleicher Weise bei Jean Paul, Gottfried Weber und bei Chladni.

Die Beschreibung der Entstehung des Klangs bei Zungenpfeifen passt im Übrigen gut zu Praetorius' Verwendung von *Resonantz* im Sinne von prägender Überformung eines Klanges.

Mindest ebenso bedeutsam wie die Frage, ob Ton oder Klang der adäquatere Wortbestandteil des neuen Fachbegriffs darstellt, ist die Frage, weshalb denn *Farbe* und nicht *Qualität*, *Charakter* oder *Gepräge* sich als zweite Hälfte des Kompositums durchsetzen, zumal Farbe seit Castels Farbklavieren zur Anwendung auf Klingendes tabu zu sein scheint.

4.4.5. Andersch 1829

Johann Daniel Andersch, *Musikalisches Wörterbuch. Für Freunde und Schüler der Tonkunde*, Berlin 1829 (BE MU LBa 1829/1) [Andersch 1829]

Die Erscheinung dieses unbekannten und unbekannt gebliebenen Lexikons fällt in eine Zeit, in der sich der Begriff der Klangfarbe zu etablieren scheint. Er wird aber darin nicht verwendet. Die akustischen Kenntnisse Anderschs beziehen sich auf Chladni – er wird in anderem Zusammenhang zitiert. Zur Illustration des populärwissenschaftlichen Sprachgebrauch werden hier Auszüge aus den relevanten Artikeln wiedergegeben:

SCHALL. Die allgemeine Bezeichnung alles dessen, was auf unser Gehörwerkzeug wirkt und von demselben empfunden wird, was sich als Geräusch, Getöse, Laut, Knall, Klang, Ton u.s.w. verschieden modifiziert.

KLANG. Ein bestimmbarer, länger anhaltender Schall als ein Laut, der die Beschaffenheit und Geschwindigkeit seiner Schwingungen auffinden läßt; deswegen kann man auch an demselben eine Höhe oder Tiefe unterscheiden. Die erste Ursache jedes Klanges ist die Bewegung eines durch irgend eine Kraft aus seiner Ruhe gebrachten elastischen Körpers; die nothwendige Bedingung aber, daß diese Bedingung von dem Ohre gefühlt werde, ist erstlich die Luft und das in Bewegungsgesetzen der Theile derselben; denn in einem luftleeren Raum ist kein Schall vernehmbar [...] : ferner, daß die ursprüngliche Schwingungen des elastischen Körpers und durch diesen der in demselben enthaltenen Luft, die aber mit der äusseren in Verbindung stehen muß, mitgetheilet werden.

TON. Ein, durch eine bestimmte Höhe oder Tiefe, sich auszeichnender Klang.

TONHOEHE. Acutezza. i. Die dem Ohre fühlbare Modifikation des Tons, welche durch Vermehrung der Schwingungen der Lufttheile erzeugt wird. [...]

Ein Klang lässt die „Geschwindigkeit seiner Schwingungen auffinden“, weil er so lange dauert, dass das Gehör, die Periodizität seiner Schwingungen in einer nicht näher bestimmten Weise bestimmen kann. Ein Klang hat notwendigerweise eine Tonhöhe. Das heisst er ist periodisch. Die Definition des Tons als Klang mit einer bestimmten Höhe oder Tiefe, erlaubt es folglich nicht, Ton und Klang zu unterscheiden. Ein Ton ist nicht ein Spezialfall von einem Klang, denn jeder Klang hat eine Tonhöhe und ist deshalb auch ein Ton.

Ein Klang lässt aber auch „die Beschaffenheit seiner Schwingungen auffinden“, das heisst er erlaubt es auch, die von der Tonhöhe verschiedenen Bestimmungsmerkmale zu erkennen. Die Frage wann der Begriff Ton und wann Klang zu gebrauchen ist, ist demnach nur noch eine Frage der Perspektive. Ist man mehr an den Tonhöhenrelationen interessiert, gebraucht man das Wort Ton, stehen dagegen die qualitativen Merkmale im Vordergrund, so ist der Begriff Klang adäquater. Andersch beschreibt die heute übliche Verwendung der beiden Begriffe.

Dass bei Andersch kaum eine Differenzierung zwischen Klang und Ton gemacht wird, lässt sich auch am Artikel „Aliquotentöne“ aufzeigen:

ALIKUOTENTOENE. Nebenklänge. Klänge, welche bei dem Anschlagen einer Saite auch bei dem Blasen einer Trompete, sich nach und nach neben dem Haupttone hören lassen. Sie werden gebildet, indem nicht allein die ganze Saite in eine allgemeine Schwingung versetzt wird, sondern indem auch einzelne abgemessene Theile derselben ihre besonderen Schwingungen, deren Anzahl durch die Kürze derselben vermehrt wird, erhalten. Bei genauer Aufmerksamkeit hört man, daß dem Grundtone die Quinte der Octave, ferner die Terz der Doppeloctave, endlich selbst die Octave und Doppeloctave, u.s.w. folgt.

In Anlehnung an Chladni ist ein *Aliquotenton* ein Klang, eine schwingende Saite verursacht demnach eine Vielheit von Klängen. Die einzelnen Klängen führen dabei ihr Eigenleben, denn sie setzen im Allgemeinen nicht simultan mit dem Hauptton ein. Zum Schall einer schwingenden Saite oder einer Trompete gehört also ein sich veränderndes Klangspektrum. Diese Spektraldynamik ist nicht etwa ausschliesslich als Phänomen der Aufmerksamkeitslenkung zu taxieren.

Die Periodizität als charakterisierendes Merkmal reicht zur Unterscheidung von Vielheiten und Einheiten nicht aus. Das Hinzufügen eines weiteren Aliquotentons/Nebenklangs zum stationären Anteil eines harmonischen Klangs ergibt nämlich ein Schallsignal mit gleicher Periodizität, das heisst die Vielheit einer Zusammensetzung, ihre Beschaffenheit, kann aus der neuen Einheit allein mithilfe der Periodizität nicht rekonstruiert werden.

Die folgenden Artikel und Auszüge geben einen Eindruck vom Sprachgebrauch der Zeit im Umfeld der qualitativen Klangcharakterisierung:

HARMONIE. In der Orgelbaukunst bedeutet dieser Ausdruck : Ton, Klanggehalt. Nicht sagt man: diese Stimme hat einen guten, hellen Ton u.s.w. sondern: sie hat eine volle, laute, dumpfe, Harmonie.

ORGELSTIMME. Jeu f. Die Gruppe oder Reihe von Pfeifen, welche zu einem Register gehören, und deren Töne in Hinsicht der Höhe und Tiefe, aber nicht in Hinsicht des Klanges verschieden sind.

PFEIFEN. Orgelpfeifen. Röhrenförmige Körper, welche [...] in der Orgel gleichsam die Stellvertreter für die einzelnen Töne der verschiedenartigsten musikalischen Instrumente sind.

RESONANZ. Verstärkung des Klangs, Forthall, Résonance. f.

RESONANZBODEN. [...] Von der richtigen Bauart und seiner natürlichen Beschaffenheit und Güte, hängt vorzüglich die mehr oder mindere Schönheit des Tones ab, indem er den von der Saite angegebenen Ton verstärkt wiedergiebt. [...]

VIOLINE. [...] unter allen Instrumenten das am häufigsten verwendete und kultivirte. Ihr lauter und lieblicher Klang giebt ihr den Vorzug vor allen andern, und keines vermag so wie sie, Gefühle und Leidenschaften auszudrücken, und mit der menschlichen Stimme wetteifern [...]

Chladnis Vorschlag *Laut* von 1827 kommt bei Andersch als Äquivalent zu *timbre* nicht vor. Mit *Harmonie*, *Klanggehalt*, *Ton* und *Klang* stehen aber gleich vier Kandidaten zur Auswahl. Einzig Klanggehalt scheint keine weiteren Bedeutungen zu haben. Abgesehen von der fehlenden synästhetischen Komponente ist Klanggehalt gleichbedeutend zur heutigen Klangfarbe und eine weniger verhängliche Übersetzung von *timbre* als letztere.

Dass bei Andersch die Begriffe Klang und Ton nicht so klar geschieden sind wie bei Koch, ist wohl auf Chladnis Einfluss zurückzuführen. Dass *timbre* beziehungsweise *Klanggehalt* nicht artikelwürdig sind, entspringt wohl einer eher oberflächlichen Beschäftigung Anderschs mit

Chladni – zitiert wird nur die Akustik 1802 – ansonsten hätte Andersch über die von Chladni wiederholt konstatierte Lücke der deutschen Fachsprache stolpern können.

Die von Andersch beobachtete dynamische Veränderung des Teiltongehalts (Klanggehalts) während des Klingens bedeutet eine wesentlich schwierigere Klassifikationsaufgabe als die später von Helmholtz vorgeschlagene, von allen Ausgleichsvorgängen abstrahierende Definition des „musikalischen Anteils der Klangfarbe“. Eine Theorie und Visualisierung von sich dynamisch ändernden Klängen zeichnet sich erst wieder in den Arbeiten von Grey, Risset, Chowning im letzten Drittel des 20. Jahrhunderts ab, sieht man von den eher unbekannt gebliebenen periodischen Klangfarbenänderungen durch Verstimmung von Teiltönen bei ter Kuile [1902] ab. Die Mathematik dazu wird erst im 20. Jahrhundert nachgeliefert.

4.4.6. Berlioz und die Emanzipation der Klangfarbe

Mettez deux Hautbois à la place de deux Clarinettes, et l'effet sera détruit.

Hector Berlioz, *Traité d'instrumentation et d'orchestration*, Nouvelle Édition suivi de „L'art du chef d'orchestre“, Nouvelle Édition, Henry Lemoine (1876), Paris – Bruxelles, Gregg International Publishers Limited, Westmead 1970 [Berlioz 1876]

Instrumentationslehre von Hector Berlioz. Ein vollständiges Lehrbuch [...] Autorisierte deutsche Ausgabe von Alfred Dörffel, Leipzig 1864 [Berlioz, 1864]

Die französische Erstausgabe erscheint 1844 bei Schonenberger in Paris, gleichzeitig wird das Werk „op. 10“ in deutscher Sprache bei Schlesinger und in italienischer Sprache bei Ricordi publiziert, auf englisch 1856 bei Novello, London, und auf spanisch bei Minuesa, Madrid 1860 [für eine Übersicht vgl. Macdonald, 2002]. Die hier verwendete erste autorisierte deutsche Übersetzung ist aus terminologischen Gründen besonders aufschlussreich. Leider stand mir keine französische Erstausgabe zur Verfügung.

In der Einleitung thematisiert Berlioz die Dialektik des Neuen und exemplifiziert sie an den drei bisherigen Eckpfeilern der Musik, die Harmonie, die Melodie und die Modulation. Der anfänglichen Verdammung folgt ihre übertriebene Anwendung und zuletzt die Normalisierung, wo die Zeit alle Dinge an ihre rechten Platz gerückt hat. Die Instrumentation steht noch nicht am Ende dieses Prozesses:

Quant à l'instrumentation, à l'expression et au rythme, c'est une autre affaire. Leur tour d'être aperçus, repoussés, admis, enchainés, délivrés et exagérés, n'étant venu que beaucoup plus tard, ils ne peuvent donc encore avoir atteint le point où parvinrent avant eux les autres branches de l'art. Disons seulement que l'instrumentation marche la première; elle en est à l'exagération. [Berlioz 1876, 1]

Was freilich die Instrumentation, den Ausdruck und den Rhythmus anbelangt, so ist's damit eine andere Sache. Da diese viel später erst an die Reihe gekommen sind, um beachtet, zurückgesetzt, zugelassen, dann eingezwängt, wieder befreit und endlich übertrieben zu werden, so können sie auch den Punkt noch nicht erreicht haben, an dem die anderen Kunstzweige bereits angelangt sind. Sagen wir nur, daß die Instrumentation voranschreitet, sie ist in dem Stadium der Uebertreibung [Berlioz 1864, 3]

Folgende provozierende Bemerkung eröffnet die kurzen theoretischen Bemerkungen des Hauptteils. Jeder klingende Körper, den der Komponist vorschreibt, ist oder wird zum Musikinstrument:

Tout corps sonore mis en œuvre par le
Compositeur est un instrument de musique
[Berlioz 1876, 2]

Jeder klangerzeugende Körper, welchen der
Componist in Anwendung bringt, ist ein
Musikinstrument [Berlioz 1864, 4]

Handelt es sich hier um Anarchie der Mittel unter totalitärer Anordnung durch den Komponisten, unter der der Klangfarbe zu ihrer Emanzipation verholten werden soll? Die Musikinstrumente werden in drei Gruppen eingeteilt: Saiteninstrumente, Blasinstrumente, Schlaginstrumente. Bei der dritten Kategorie fällt ihre Einteilung in zwei Gruppen auf:

EN INSTRUMENTS A PERCUSSION.

D'une sonorité fixe et appréciable.

Les Timbales, Les Cymbales antiques, les Jeux de timbres, le Glockenspiel, l'Harmonica à clavier, les Cloches

D'une sonorité indéterminable et produisant seulement des bruits diversement caractérisés.

Les Tambours, Grosses – Caisses, Tambours des basque, Cymbales, Triangles, Tamtams, Pav. Chinois. [Berlioz 1876, 2]

Dörffels Übersetzung

Von fester, genau bestimmbarer Tonhöhe [...]

Von unbestimmter Tonhöhe und bloß der Schallwirkung nach von verschiedenem Charakter [Berlioz 1864, 4-5]

weicht der Übersetzung von *bruit* aus und verstärkt den rezeptiven Aspekt der diesbezüglich eher neutralen *sonorité*.

Die Aufgabe der Instrumentation sieht Berlioz wie folgt:

L'emploi de ces divers éléments sonores et leur application soit à *colorer* la mélodie, l'harmonie et le rythme, soit à produire des impressions *sui generis* (motivées ou non par une intention expressive,) indépendantes de tout concours des trois autres grandes puissances musicales, constitue *l'art de l'instrumentation*. [Berlioz 1876, 2]

In dem Gebrauche dieser verschiedenen Klangelemente nun und in deren Verwendung, sei es um der Melodie, der Harmonie und dem Rhythmus eigenthümliche Färbung zu verleihen, oder sei es, um, unabhängig von jedem Zusammenwirken mit den drei anderen musikalischen Großmächten, Eindrücke *sui generis* (auf bestimmte Absicht sich gründend oder nicht gründend) hervorzubringen, - besteht die Kunst der Instrumentation. [Berlioz 1864, 5]

Die Verwendung der klingenden Elemente kann dazu dienen Melodien zu kolorieren, sie können aber auch dazu dienen zum Selbstzweck, ohne expressive Absicht, Eindrücke hervorzurufen, die von den drei musikalischen Grossmächten unabhängig sind. Die Verwendung von *colorer* in diesem Zusammenhang könnte auf die Kenntniss des deutschen Begriffs Klangfarbe hinweisen.

Unter dem poetischen Aspekt kann die Kunst der Instrumentation nicht gelehrt werden. Gegeben kann, um mit Schönberg zu sprechen, bestenfalls eine Handwerkslehre:

On apprend ce qui convient aux divers instruments, ce qui pour eux est praticable ou non, aisé ou difficile, sourd ou sonore; on peut dire aussi, que tel ou tel instrument est plus propre que tel autre à rendre certains effets à exprimer certains sentiments; quant à leurs associations par groupes, par petits orchestres et par grandes masses, quant à l'art de les unir, de les mêler, de façon à modifier le son des uns par celui des autres, en faisant résulter de l'ensemble un son particulier que ne produirait aucun d'eux isolément, ni réuni aux instruments de son espèce, on ne peut que signaler les résultats obtenus par les maîtres en indiquant leurs procédés; résultats qui sans doute, seront encore modifiés de mille manières en bien ou en mal par les compositeurs qui voudront les reproduire. [Berlioz 1876, 2]

In der zusammenfassenden Schlussbemerkung des ersten Kapitels fällt erstmals der Begriff *timbre*:

L'objet de cet ouvrage est donc d'abord, l'indication de l'*étendue* et de certaines parties essentielles du *mécanisme* des instruments, puis l'étude fort négligée jusqu'à présent, de la nature du *timbre*, du *caractère* particulier et des facultés *expressives* de chacun d'eux et enfin celle des meilleurs procédés connus pour les grouper convenablement. Tenter de s'avancer au delà, ce serait vouloir mettre le pied sur le domaine de l'inspiration, ou le génie seul peut faire des découvertes, parce qu'il n'est donné qu'à lui de le parcourir. [Berlioz 1876, 2]

Der Zweck des vorliegenden Werkes ist demnach zuerst der Nachweis des *Umfanges* und die Angabe gewisser Haupteigenschaften der *Mechanik* der Instrumente; sodann das – bisher sehr vernachlässigte – Studium der Natur des *Klanges*, des eigenthümlichen *Charakters* und der *Ausdrucksfähigkeit* eines jeden von ihnen; und endlich das Studium der besten bekannten Verfahrensweisen, sie angemessen zusammenzustellen. Wollte man versuchen weiter hinauszugehen, so müßte man den Fuß auf das Gebiet schöpferischer Eingebung setzen, ein Gebiet, woselbst nur der Genius Entdeckungen machen kann, dem allein es vergönnt ist, dasselbe zu durchstreifen. [Berlioz 1864, 6]

Eine Definition dieses für die Abhandlung zentralen Begriffs findet sich leider nicht. Ganz eng zusammen hängt *timbre* mit dem speziellen Charakter eines Musikinstruments und mit seiner Ausdrucksfähigkeit. Eine nähere semantische Bestimmung von Berlioz Klangfarbenbegriffs wird am Ende dieses Kapitels durch eine Analyse des Anwendungskontexts der Begriffe *timbre*, *sonorité*, *caractère* gegeben. Dörffel übersetzt *timbre* mit *Klang*, möglicherweise um die Klangfarbe nicht auf ihre Funktion des Färbens bestehender harmonischer oder melodischer Strukturen zu reduzieren. Sie soll ja auch dazu dienen Effekte *sui generis* hervorzubringen. Schönbergs *Klangfarbenmelodie* ist ein ähnliches Postulat durch begriffliche Vermengung mit einer der musikalischen Grossmächte.

Orgel und Orchester

Aus einem theoretischen Blickwinkel sind die Kapitel zur Orgel und zum Orchester von besonderem Interesse, da in in ihnen die Variabilität der Klangfarbe eingebaut ist. Bei den antiken Orgel der Griechen, diente die Registrierung vermutlich der Modifikation der Tongeschlechter, zum Beispiel der Verwandlung des Enharmonischen ins *Chromatische* ...

Le nombre plus ou moins grand de séries de tuyaux de différentes natures et de différentes dimensions que possède un orgue, lui donne une variété proportionnée de *jeux*, au moyen desquels l'organiste peut changer le *timbre*, la force de sonorité et l'*étendue* de l'instrument.

Die größere oder geringere Anzahl Reihen der Pfeifen verschiedener Natur und Größe, die sich in einer Orgel befinden, ertheilt ihr eine verhältnißmäßige Mannigfaltigkeit von Stimmen, mittelst deren der Organist die *Klangfarbe*, die Schallkraft und den Umfang des Instruments

On appelle *Registre*, le mécanisme au moyen duquel, en tirant une petite pièce de bois, l'organiste fait parler tel ou tel jeu. [Berlioz 1876, 167]

beliebig verändern kann. Register heißt derjenige Mechanismus, mittelst dessen man, einen kleinen Zug in Bewegung setzend, diese oder jene Stimme zur Ansprache bringt. [Berlioz 1864, 113]

Dies ist eines der wenigen, wenn nicht das einzige Vorkommen von *timbre*, das Dörffel mit *Klangfarbe* wiedergibt. Der Organist kann also durch Ziehen von Registern über die Klangfarbe, die Klangstärke und den Ambitus frei verfügen.

Les jeux de l'orgue se divisent en jeux à *Bouche* et en jeux d'*Anche*; ainsi nommé, les premiers, d'une sorte de bouche ouverte à l'une de leurs extrémité et qui sert à la formation du son, les seconds d'une languette de cuivre placée également à l'extrémité du tuyau et qui produit un **timbre** spécial. [Berlioz 1876, 168]

Die Stimmen der Orgel werden in *Labial*- oder *Flöten*-, und in *Schnarr*- oder *Rohrwerke* eingetheilt. Die Ersteren haben ihren Namen von einer Art Labien (Lippen), welche sich an dem einen Ende der betreffenden Pfeifen befinden und zur Bildung des Tones dienen; die Anderen dagegen von einer Art messingener Zunge, die gleichfalls am Ende einen eigenthümlichen **Tonklang** hervorbringt. [Berlioz 1864, 114]

Mund und Zunge sind die beiden Körperteile, die im Französischen die Einteilung der Orgelpfeifen veranschaulichen. Der Klang der Orgelpfeife rückt in semantische Nähe zur menschlichen Stimme, wobei die metaphorische Gleichsetzung von Mund und Tonerzeuger ebenso wenig gelingt wie diejenige von Zunge und Klangformer. Akustisch gesehen besteht eine Korrelation übers Kreuz: Die Zunge der Zungenpfeife ist ihr Tonerzeuger und der Mund wirkt bei der Stimme als Klangformer.

Berlioz' Bewertung der Mixturregister ist anlässlich der zeitgleichen Auseinandersetzung zwischen Ohm und Seebeck bemerkenswert (die Passage findet sich nicht im Vorabdruck 21.11.1841 - 17.7.1842 in der *Revue und Gazette musicale* [Berlioz, 1994]):

Les jeux de mutation ont cela d'étrange qu'ils font entendre au dessus de chaque son la tierce, la quinte la dixième, la douzième &, de ce même son, de manière à figurer, par l'action de plusieurs petits tuyaux, les aliquotes ou sons harmoniques des grandes tuyaux. Les facteurs d'orgues et les organistes s'accordent à trouver excellent l'effet produit par cette résonnance multiple, qui en définitive cependant, fait entendre simultanément plusieurs tonalités différentes. "Ce serait insupportable, disent-ils, si on distinguait les deux sons supérieurs, mais on *ne les entend pas*, le son le plus grave les absorbe." Il reste alors à faire comprendre comment ce qu'on n'*entend pas* peut produire un bon effet sur l'oreille. En tout cas ce singulier procédé tendrait toujours à donner à l'orgue la résonnance harmonique qu'on cherche inutilement à éviter sur les grands pianos à queue, et qui, à mon sens, est un des plus terribles inconvénients de la sonorité que les perfectionnements modernes ont fait acquérir à cet instrument. [Berlioz 1876, 168]

Die Nebenstimmen haben die Eigenthümlichkeit, daß sie durch Mitwirkung mehrerer kleiner Pfeifen die Aliquottheile oder harmonischen Thöne der grossen Pfeifen bilden. Orgelbauer wie Organisten sind einstimmiger Ansicht von der Vortrefflichkeit der durch diese vervielfachte Resonanz hervorgebrachten Wirkung, obgleich in Wahrheit dabei mehrere Tonarten zu gleicher Zeit erklingen. „Es wäre allerdings unerträglich, sagen sie, wenn man die beiden höheren Töne zu unterscheiden vermöchte, aber sie sind unvernnehmbar, weil der tiefere Ton sie überstimmt.“ Es bleibe also begreiflich zu machen, wie das, was man nicht hört, eine gute Wirkung auf das Ohr auszuüben vermag. Jedenfalls ertheilt dieses sonderbare Verfahren der Orgel die harmonische Resonanz, welche man bei den grossen Pianofortes in Flügelform vergeblich zu vermeiden sucht, und die, meiner Meinung nach, einer der schrecklichsten Uebelstände hinsichtlich des Wohlklangs bildet, welchen die neueren Verbesserungen des Instruments zur Folge gehabt haben. [Berlioz 1864, 115]

Die Mixturen, welche die Aliquotentöne aus dem Durdreiklang mischen, werden von den Organisten und Orgelmachern zwar als ausgezeichnet angesehen, sie produzieren aber durch ihre mehrfache Resonanz mehrerer gleichzeitige „Tonalitäten“. Das Gegenargument, dass der Grundton die verschiedenen Teiltöne absorbiere, lässt Berlioz nicht gelten, denn was nicht hörbar ist, kann keinen guten Effekt auf das Gehör haben. Dass die Absorption der Teiltöne, eine Veränderung der Klangfarbe des Tons zur Folge haben könnte, sobald man sie nämlich nicht mehr gesondert wahrnimmt, leuchtet ihm nicht ein. Es ist zu fragen, ob Berlioz sich je hörend mit solchen Klangsynthesen auseinandergesetzt hat. Das Argument der Absorption der Teiltöne ist mit demjenigen des Herüberziehens bei Ohm/Seebeck verwandt. Berlioz Klangideal (wohl nicht nur für Klaviere) ist dasjenige der Obertonfreiheit. Beim Klavier versucht man vergeblich, die lästigen hörbaren Obertöne zu unterdrücken.

Es folgt eine Liste von gebräuchlichen Mixturregistern und ihrer harmonischen Zusammensetzung und Berlioz beurteilt sie abschliessend so:

Ces divers jeux **imitent assez bien par leur timbre** les instrument dont ils portent le nom.
[Berlioz 1876, 169]

Alle diese verschiedenen Stimmen ahmen
vermitteltst ihres Klanges die Instrumente, deren
Namen sie führen, ziemlich gut nach. [Berlioz
1864, 116]

Trotz seiner negativen Einschätzung der Mixturen imitieren sie die gleichnamigen Musikinstrumente recht gut. Dass dies an der Mixtur selbst, an der Abstimmung ihrer Komponenten liegen könnte, zieht Berlioz nicht in Betracht. Folgende Passagen thematisieren die Positionierung der Orgel in der Hierarchie der Musikinstrumente. Auch hier bedient sich Berlioz des Vokabulars der Politik:

L'orgue semble pouvoir, ainsi que le piano et beaucoup mieux que lui, se présenter dans la hiérarchie instrumentale, sous deux faces: comme un instrument adjoint à l'orchestre, ou comme étant lui même un orchestre entier et indépendant. Sans doute il est possible de mêler l'orgue aux divers éléments constitutifs de l'orchestre, on l'a fait même plusieurs fois; mais c'est étrangement rabaisser ce majestueux instrument que de le réduire à ce rôle secondaire; il faut en outre reconnaître que sa sonorité plane, égale, uniforme, ne se fond jamais complètement dans les sons diversement caractérisés de l'orchestre, et qu'il semble exister entre ces deux puissances musicales une secrète antipathie. L'orgue et l'orchestre sont Rois tous les deux; ou plutôt l'un est Empereur et l'autre Pape; leur mission n'est pas la même, leurs intérêts sont trop vastes et trop divers pour être confondus. [Berlioz 1876, 168]

L'orgue a des effets de sonorité douce, éclatante, terrible, mais il n'est pas dans sa nature de les faire succéder rapidement, il ne peut donc, comme l'orchestre, obtenir le passage subit du *Piano* au *Forte*, ou de *forte* au *piano*. Au moyen des perfectionnements apportés récemment dans sa fabrication, il peut, en introduisant successivement différents jeux qui s'accumulent, produire une sorte de crescendo, et amener par conséquent le *decrescendo* en les retirant dans le même ordre. Mais la gradation et la dégradation de son ne passent pas encore, au moyen de cet ingénieux procédé, par les nuances intermédiaires qui donnent tant de puissance à ces mouvements de l'orchestre; on sent toujours plus ou moins l'action d'un mécanisme inanimé. L'instrument d'Erard, connu sous le nom d'orgues expressif, donne seul la possibilité d'enfler et diminuer réellement le son, mais il n'est pas encore admis dans les églises. Des hommes graves, d'un excellent esprit d'ailleurs, en condamnent l'usage comme destructeur du caractère et de la destination religieuse de l'orgue.

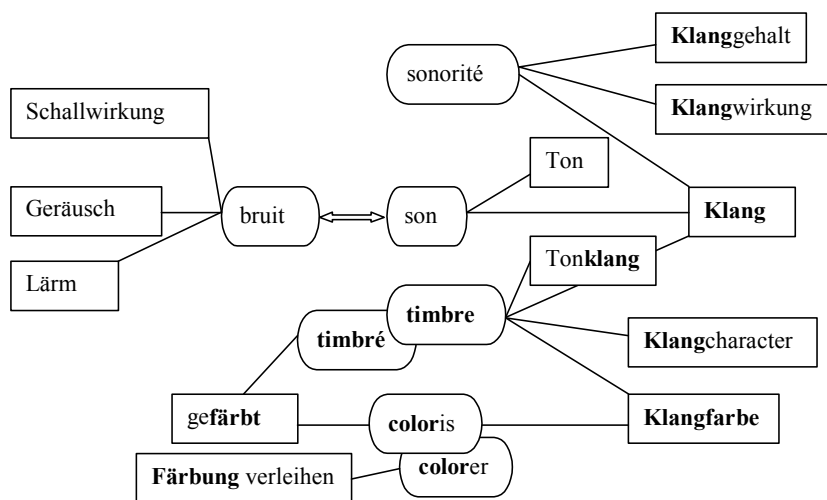
[...] nous nous permettrons cependant de faire observer aux partisans de la musique *Plane*, du *plain chant*, de l'orgue *inexpressive* (comme si les jeux forts ou doux et diversement **timbrés** n'établissaient pas déjà dans l'orgue la variété et l'expression,) nous nous permettrons, dis-je, de leur faire observer qu'ils sont les premiers à se récrier d'admiration quand l'exécution d'un chœur, dans une œuvre sacrée, brille par la finesse des nuances par les effets de crescendo, de decrescendo, de clair obscur, de sons enflés, soutenus, éteints, en un mot, par toutes les qualités qui manquent à l'orgue, et que l'invention

d'Erard tendrait à lui donner. [...] Quant à nous, et pour rentrer tout à fait dans notre sujet, nous avouons que si l'invention d'Erard était appliquée à l'orgue ancien, seulement comme un jeu nouveau de manière à ce qu'il fut facultatif à l'organiste d'employer les sons expressifs ou de n'en pas faire usage, ou du moins de manière à pouvoir enfler et diminuer certains sons indépendamment des autres, ce serait un perfectionnement réel et tout à l'avantage du *vrai* style religieux.[Berlioz 1876, 169]

[...] als wenn die starken, sanften und verschiedenartig **gefärbten** Stimmen nicht schon Mannigfaltigkeit und Ausdruck in die Orgel hineinbrächten [Berlioz 1864, 120]

Angesichts seiner Gleichsetzung des Orchesters mit dem weltlichen und der Orgel mit dem geistlichen Oberhaupt der Welt liest sich Berlioz Kritik an der gebräuchlichen Orgel als feuerspeiende Attacke gegen eine unbewegliche, farblose und kontrastarme katholische Kirche.

Das Begriffsfeld von *timbre* und *Klangfarbe*



Das Begriffsfeld von *timbre* und *Klangfarbe* bei Berlioz [1876 frz., 1864 dt.]. Kästchen sind mit einander verbunden, wenn die Termini ein Übersetzungspaar bilden. Bemerkenswert ist das vereinzelte Übersetzungspaar *timbre*/Tonklang (Mattheson!).

In allen Übersetzungen von *timbre* kommt *Klang* als Wortbestandteil vor. Hervorzuheben ist das Übersetzungspaar *timbré*/gefärbt.

Sehr häufig wenn von *timbre* die Rede ist, fallen auch die Begriffe *effet* und *caractère*, sie werden von Dörffel immer mit *Wirkung* und *Character* wiedergegeben. Sie wurden in obiger Darstellung nicht berücksichtigt, ebensowenig *accent*, der an einer Stelle in einer ähnlichen Bedeutung gebraucht und dort mit *Ausdruck* übersetzt wird.

Die folgende Tabelle zeigt – ohne Anspruch auf Vollständigkeit – Kombinationen der Schlüsselbegriffe mit charakterisierenden Adjektiven.

sonorité
courte
effacé
égale
faible
grave
nouvelle
onctueuse
particulière
spéciale
terrible
voilée

timbre
agreste
cristallin
doux
expressif
faible
grêle
naïf
nazillard
originel
piquant
sauvage
sinistre
solennelles
pathétique
dépourvu
d'éclat et de
noblesse

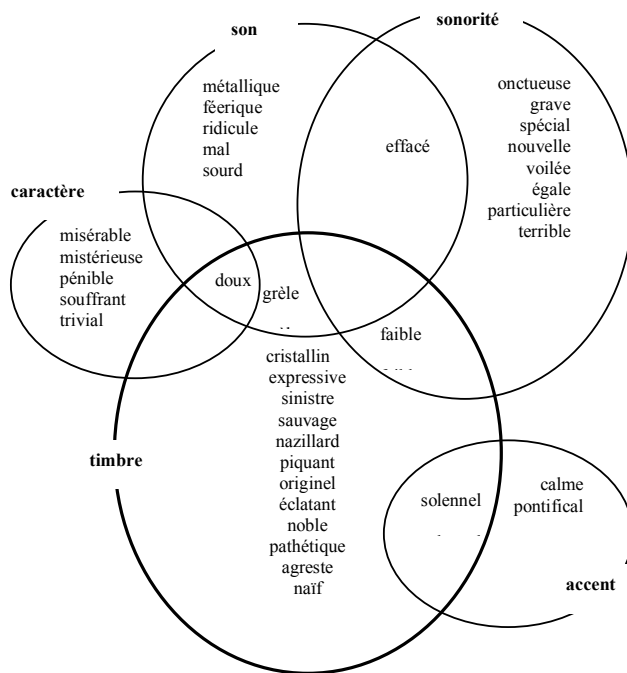
caractère
doux
misérable
mystérieux
pénible
souffrant
trivial

son
doux
effacé
féerique
frémissant
grêle
mal
métallique
ridicule
sourd

accent
calme
pontifical
solennel

bruit
grotesque
laid

In einem Mengendiagramm präsentieren sich diese Kombinationen so:



4.4.7. Helmholtz zu Farbe und Ton

Ueber die Theorie der zusammengesetzten Farben, Physiologisch optische Abhandlung, Unger, Berlin 1852 [Helmholtz 1852]

Ueber die physiologischen Ursachen der musikalischen Harmonien, 1857, hg. Fritz Krafft, Kindler, München 1971 (nach "Vorträge und Reden von Hermann von Helmholtz" 4. Aufl., Vieweg, Braunschweig 1896, Bd. 1, S. 119–155 [Helmholtz 1857])

Handbuch der physiologischen Optik, Leipzig 1867, 2. Auflage Hamburg/Leipzig 1896 [Helmholtz 1867] [Helmholtz ²1896]

Immer wieder kommt Hermann Helmholtz auf den Vergleich von Auge und Ohr zu sprechen. Sein *Handbuch der physiologischen Optik* ist in ihrem Gebiet genauso Standardwerk wie die *Lehre der Tonempfindungen*, und die beiden Werke sind parallel entstanden.

Physiologisch/philosophischer Hintergrund ist dabei Müllers vereinheitlichende Theorie der spezifischen Sinnesreizungen, wonach die verschiedenen Sinneszellen nur mehr oder weniger starke Erregungen an die höheren Zentren weitergeben, weshalb eine rein mechanische Reizung der Retina auch einen Farbeindruck hervorrufen kann [Schulisch 1982, 57-60; Meyering 1989, 133-142].

In seinem Habilitationsvortrag *Ueber die Theorie der zusammengesetzten Farben* [1852] kommt Helmholtz noch zu einer negativen Einschätzung der „Lehre von den drei Grundfarben, als den drei Grundqualitäten der Empfindung, wie sie Thomas Young aufgestellt hat“ [Helmholtz 1852, 22]. Der dortige Vergleich mit den Tönen beschränkt sich auf die Feststellung, dass das Auge zusammengesetzte Farben – im Unterschied zum Ohr zusammengesetzte Töne – nicht in ihre Bestandteile zerlegen könne [Helmholtz 1852, 3]. In seinem populären Vortrag von 1857 hingegen heisst es:

Andererseits war für die Feststellung der consonierenden Intervalle die Fähigkeit des Ohres, Obertöne zu empfinden und zusammengesetzte Wellensysteme nach dem *Fourier'schen* Satze in einfache auflösen zu können, nothwendig. [...] Wie wesentlich die genannte physiologische Eigenthümlichkeit des Ohres ist, wird namentlich klar, wenn wir es mit dem Auge vergleichen. Auch das Licht ist eine Wellenbewegung eines besonderen, durch den Weltraum verbreiteten Mittels, des Lichtäthers; auch das Licht zeigt die Erscheinungen der Interferenz. Auch das Licht hat Wellen von verschiedener Schwingungsdauer, die das Auge als verschiedene Farben empfindet, z. B. die mit grösster Schwingungsdauer als Roth; dann folgen die Farben Orange, Gelb, Grün, Blau und Violett, dessen Schwingungsdauer etwa halb so gross ist, als die des äussersten Roth. Aber das Auge kann zusammengesetzte Lichtwellensysteme nicht von einander scheiden; es empfindet sie in einer nicht aufzulösenden, einfachen Empfindung, der einer Mischfarbe. Es ist ihm deshalb gleichgültig, ob in der Mischfarbe Grundfarben von einfachen oder nicht einfachen Schwingungsverhältnissen vereinigt sind. Es hat keine Harmonie in dem Sinne wie das Ohr; es hat keine Musik. [Helmholtz 1857, 53-54]

Im *Handbuch der physiologischen Optik* kommt Helmholtz an verschiedenen Stellen auf die unterschiedliche Art der Signalverarbeitung durch Auge und Ohr zu sprechen. Ein prinzipieller Unterschied liege neben dem verschieden grossen Frequenzbereich im Resonanzverhalten der Rezeptoren. Während die einzelnen Fasern des Hörnerven jeweils nur für einen engen Frequenzbereich empfindlich seien, reagiere jeder der drei Typen von Farbrezeptoren auf alle Frequenzen des sichtbaren Lichtes, aber in unterschiedlicher Stärke, das heisst jede Farbeempfindung sei das Ergebnis des Zusammenwirkens aller drei

Rezeptortypen und die Unterscheidung in einfache und zusammengesetzte Farben für normales Sehen vom physiologischen Standpunkt aus sinnlos [vgl. Muzzulini 2000].

Das Ohr empfindet etwa 10 Octaven verschiedener Töne, das Auge nur eine Sexte, obgleich die jenseits dieser Grenzen liegenden Schwingungen beim Schall wie beim Lichte vorkommen und physikalisch nachgewiesen werden können. Das Auge hat nur drei von einander verschiedene Grundempfindungen in seiner kurzen Scala, aus denen sich alle seine Qualitäten durch Addition zusammensetzen, nämlich Roth, Grün, Blauviolett. Diese mischen sich in der Empfindung, ohne sich zu stören. Das Ohr hingegen unterscheidet eine ungeheure Zahl von Tönen verschiedener Höhe. Kein Accord klingt gleich einem anderen Accorde, der aus anderen Tönen zusammengesetzt ist, während doch beim Auge gerade das Analoge der Fall ist. Denn gleich aussehendes Weiß kann hervorgebracht werden durch Roth und Grünblau des Spectrums, durch Gelb und Ultramarinblau, Grüngelb und Violett, Grün, Roth und Violett, oder durch je zwei, drei oder alle diese Mischungen zusammen. Wären im im Ohre die Verhältnisse die gleichen, so wären gleichtönend Zusammenklänge, wie: C und F, D und G, E und A, oder C, D, E, F, G, A u. s. w. Und, was in Bezug auf die objektive Bedeutung der Farbe bemerkenswerth ist, es hat noch keine einzige physikalische Beziehung aufgefunden werden können, in der gleich aussehendes Licht, regelmäßig gleichwertig wäre, als allein die Wirkung auf das Auge. Endlich hängt die ganze Grundlage der musikalischen Wirkung von Consonanz und Dissonanz von dem eigenthümlichen Phänomen der Schwebungen ab. [...] Das physikalische Phänomen würde beim Zusammenwirken zweier Lichtwellenzüge ganz ebenso vorkommen können, wie beim Zusammenwirken zweier Tonwellenzüge. Aber der Nerv muß erstens fähig sein, von beiden Wellenzügen afficiert zu werden, und zweitens muß er dem Wechsel von starker und schwacher Intensität genügend schnell folgen können. In letzterer Beziehung ist der Gehörnerv dem Sehnerv erheblich überlegen. Gleichzeitig ist jede Faser des Hörnerven nur für Töne aus einem engen Intervall der Scala empfindlich, so daß nur ganz nahe gelegene Töne in ihr überhaupt zusammenwirken können, weit voneinander entfernte nicht, oder nicht unmittelbar. [...] Jede Sehnervenfaser dagegen empfindet durch das ganze Spectrum, wenn auch verschieden stark in verschiedenen Theilen. Könnte der Sehnerv überhaupt den ungeheuer schnellen Schwebungen der Lichtoscillationen in der Empfindung folgen, so würde jede Mischfarbe als Dissonanz wirken.

Wir sehen, wie alle diese Unterschiede in der Wirkungsweise von Licht und Ton durch die Art, wie der Nervenapparat gegen sie reagiert, bedingt sind [Helmholtz 1896, 585-586]

Insbesondere kann verschieden zusammengesetztes Licht, das heisst Licht mit verschiedenem Spektrum, den gleichen Farbeindruck hervorrufen (Metamerie). Schwebungen, die gemäss Helmholtz für die musikalische Dissonanzempfindung verantwortlich sind, treten beim Sehen nicht in vergleichbarer Weise in Erscheinung. In einem Brief an du Bois-Reymond bemerkte er in diesem Zusammenhang,

[...] daß nämlich die Fasern des Acusticus, welche die höheren Töne empfinden, instande sein müssen, bis 150 Wechsel von Erregungen und Ruhe (150 Schwebungen) in der Sekunde von einer kontinuierlichen Erregung zu unterscheiden, während in Sehnerv und Muskel schon 10–15 Wechsel in der Sekunde als kontinuierliche Wechsel wirken. [Kirsten 1986, 169: 18.5.1857 Helmholtz an E. du Bois-Reymond]

Helmholtz' Farbtheorie – sie gibt Youngs These eine physiologische Präzisierung – ist vor allem auch durch die heute übliche Beschreibung der Farben durch die sogenannten Helmholtz-Koordinaten Helligkeit, Farbton und Sättigung und die entsprechende zweidimensionale Repräsentation der Farben gleicher Helligkeit in einem schuhsohlenartigen Gebilde, das sich aus den Resonanzcharakteristiken der drei Farbrezeptortypen ergibt, bedeutsam:

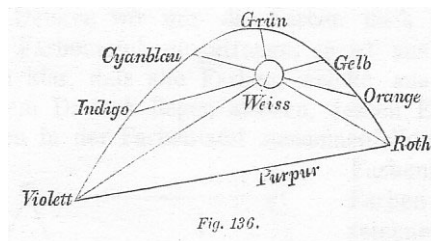


Fig. 136.

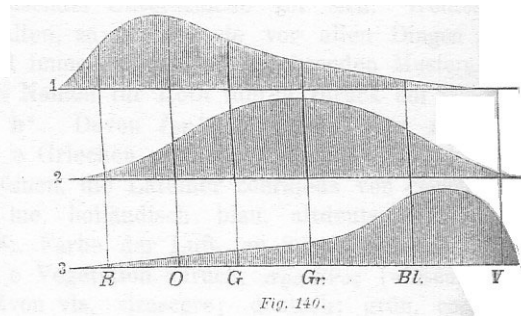


Fig. 140.

[Helmholtz 1867, 288 / 291]

Die genau Geometrie des schuhsohlenförmigen Bereichs der möglichen Farbempfindungen wurde in dieser Zeit genauer bestimmt. Bereits in der zweiten Auflage des Handbuches gibt es verbesserte Darstellungen [Helmholtz 1896, 340]. Innerhalb der grafischen Darstellung der Farbeindrücke gleicher Helligkeit soll das Prinzip der linearen Farbmischung gelten. Dies bedeutet, dass Mischungen zweier Farbeindrücke auf der geradlinigen Verbindungsstrecke der zugehörigen Punkte liegen. Und aus drei willkürlich gewählten Farben A, B, C in beliebigem Mischungsverhältnis genommen, aber mit gegebener Helligkeit, können genau diejenigen Farbeindrücke, die Punkten innerhalb des Dreiecks ABC entsprechen, gewonnen werden. Die schuhsohlenförmige Geometrie der möglichen Farbeindrücke gleicher Helligkeit erlaubt es nicht, durch Wahl dreier Punkte, die ganze Schuhsohle zu überdecken, und dieser Bereich ist deshalb nicht dreieckig, weil die drei Rezeptorzellen unter normalen Bedingungen nicht individuell angeregt werden, das heisst weil keine einfachen Farbeindrücke möglich sind. Ein verhältnismässig grosser Bereich wird aber durch die Randpunkte *Violett*, *Roth*, *Grün* abgedeckt. (Diese Umstände erklären, weshalb ein rgb-Monitor nie alle Farbeindrücke darstellen kann.) Das Gesagte bezieht sich auf Lichtmischung und nicht auf die Mischung von Körperfarben.

Die beiden Helmholtz-Koordinaten *Farbton* und *Sättigung* zu einer gegebenen Helligkeit beziehen sich auf den Unbuntpunkt (*Weiss*, d.h. für gleichstarke Empfindung auf allen drei Rezeptortypen). Je grösser der Abstand vom Unbuntpunkt ist, desto grösser ist die Sättigung einer Farbe. Die Spektralfarben zusammen mit der sogenannten Purpurlinie begrenzen den Bereich der möglichen Farbempfindungen zu einer gegebenen Helligkeit. Die Punkte der geradlinigen Verbindungen zwischen dem Unbuntpunkt und der Randlinie definieren einen Farbton. Einem Farbton entspricht deshalb ein vom Unbuntpunkt gemessener Winkel. Die Kurven der drei Rezeptortypen der zweiten Grafik können als breitbandige, überlappende Bandpassfilter im Sinne der Elektrotechnik gedeutet werden. Der breite Resonanzbuckel für Grün zeigt, dass selbst maximal gesättigtem *Roth* oder *Violett*, den beiden Eckpunkten auf der Schuhsohle, immer etwas Grünempfindung beigemischt ist.

Es ist allerdings möglich, in einen geeigneten Kontext die Erregung von nur einem der drei Rezeptortypen zu bewirken, indem nämlich vorgängig starke Reize in den beiden andern hervorgerufen werden. Durch starke vorgängige Reizung der beiden Enden der Lichtempfindung (r- und b-Zellen) ist ein folgender Grüneindruck (g-Zellen) vollständig gesättigt, weil die r- und b-Rezeptoren dann infolge Überreizung inaktiv sind. Ein solcher Farbeindruck liegt ausserhalb der Schuhsohle.

Im Vergleich dazu ist gemäss Helmholtz bei der Tonempfindung, die Erregung einer schmalen Frequenzzone möglich, und bei genügend grossem Frequenzabstand sind die

Anregungszonen und die zugehörigen Resonanzbuckel disjunkt und erlauben eine getrennte Übertragung mehrerer gleichzeitiger Sinustöne. Übertragen auf die Akustik entsprechen die obigen überlappenden Resonanzfunktionen einer Zone, in der keine ungestörte Übertragung möglich ist, wo also Interferenzerscheinungen wie Schwebungen oder Verdeckung auftreten können. Der heutige Begriff der kritischen Bandbreite trägt dieser Sachlage Rechnung. Die oben zitierte Bemerkung Helmholtz' im Brief an du Bois-Reymond besagt, dass die kritische Bandbreite für höhere Frequenzen mindestens 150 Hz beträgt, das heisst im Bereich von 1000 Hz beträgt sie mehr als einen Ganzton (nach neueren Erkenntnissen beträgt sie in diesem Frequenzbereich und normaler Lautstärke etwa eine grosse Terz). Bei Farben können im Bereich der musikalischen Intervalle keine Schwebungen auftreten, in diesem Sinne gibt es kein optisches Pendant zur Dissonanz im Sinne von Helmholtz und daher hat das Auge auch „keine Harmonie“.

Helmholtz gibt auch einen Abriss über die Versuche Töne mit Farben zu vergleichen, der hier auszugsweise wiedergegeben wird.

HARTLEY, welcher die Unterschiede der Farben auf Schwingungen verschiedener Länge zurückzuführen suchte, gewann dadurch die Möglichkeit einer directeren Vergleichung mit den Schwingungszahlen der Töne. In demselben Sinne bemerkte auch TH. YOUNG, dass der ganze Umfang des damals bekannten Theils des Spectrum einer grossen Sexte gleichkommt, daß Roth, Gelb, Blau etwa den Verhältnissen 8 : 7 : 6 entsprechen. Nachdem nun in neuerer Zeit die Größen der Wellenlängen für die verschiedenen Farben namentlich durch FRAUNHOFER's Messungen genauer bekannt geworden ist, hat DROBISCH wieder versucht, die Vergleichung der Farbenscala mit der Tonscala herzustellen. Er vergleicht wie NEWTON die Breite der Farben mit den Intervallen der sogenannten phrygischen Tonart $1:\frac{9}{8}:\frac{6}{5}:\frac{4}{3}:\frac{3}{2}:\frac{5}{3}:\frac{16}{9}:2$. Da aber das Verhältniss der Wellenlängen für die Grenzen des gewöhnlich sichtbaren Spectrum, wie es FRAUNHOFER ausgemessen hat, kleiner ist als eine Oktave, so erhebt er alle jene Verhältnißzahlen in eine Potenz, als deren Exponent er erst $\frac{2}{3}$, später $\frac{6}{7}$ wählte. [...]

Die Grenzen der Farben unter sich stimmen in diesem Schema ziemlich gut mit den natürlichen überein; [...]

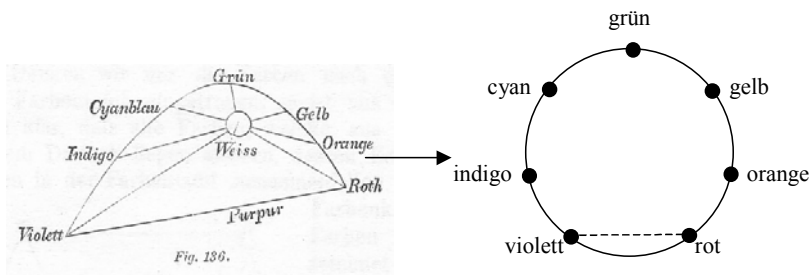
Aber wenn auch in sofern die Vergleichung stimmt, so vergesse man nicht, dass der ganze Sinn der Vergleichung zwischen Schall- und Lichtwellen schon durch die Erhebung der musikalischen Verhältnisse in eine gebrochene Potenz verloren gegangen ist, dass die Enden des Spectrum willkürlich abgebrochen sind [...]. |

Endlich hat in neuester Zeit auch UNGER versucht, auf die Vergleichung der Lichtwellenverhältnisse mit den musikalischen Intervallen eine Theorie der ästhetischen Farbenharmonie zu gründen. [...] Auf seiner chromharmonischen Scheibe hat er Farbtöne zusammengestellt, die den 12 halben Tönen der Octave entsprechen sollen, zu welchem Zweck er aber zwischen Violett und Roth purpurrothe Farben einschaltet, die als einfache Farben nicht existieren. [...]

Die vollkommenste Harmonie soll dem Durakkord entsprechen. Dieser liefert auf seiner Scheibe z. B. die viel gesehene Zusammenstellung der italienischen Maler: Roth, Grün, Violett. Aber der richtige Duraccord, wenn man grün als große Terz nimmt, wär Roth, Grün, Indigblau. [...]

Ich glaube, dass man für die richtigen Beobachtungen der Farbenwirkung, die sich bei UNGER finden, statt der erzwungenen musikalischen Analogien eine anderen Grund suchen muss. Die gesättigten Farben bilden in der That eine in sich zurücklaufende Reihe, wenn wir die Lücke zwischen den Enden des Spectrums durch die purpurnen Töne ergänzen, und dem Auge scheint es angenehm zu sein, wenn ihm drei Farben geboten werden, die ungefähr gleichweit in der Reihe auseinanderliegen. Die oben erwähnte berühmte Zusammenstellung der italienischen Maler: Roth, Grün, Violett, welche keinem richtigen Duraccorde entspricht, entspricht in Wirklichkeit den drei Grundfarben von TH. YOUNG, und darin kann der Grund ihrer ästhetischen Wirkung liegen. [Helmholtz 1867, 269-270]

Das Verfahren von Drobisch [1852], die Frequenzverhältnisse durch gebrochene Exponenten in irrationale Zahlenverhältnisse zu verändern, kommt einer musikalischen Temperierung allerdings ohne Wahrung der Oktave gleich. Eine zyklische Anordnung der Farben auf einem Kreis, wie sie bereits von Newton versucht wurde, entspricht einer Transformation der Schuhsohle auf die Kreisfläche. Da eine solche Transformation nicht linear sein kann, ist auf einer kreisförmigen Anordnung keine lineare Farbmischung im obigen Sinne möglich. Bildet man die Punkte der Purpurlinie, denen keine einfachen Spektralfarben entsprechen, auf ein Kreisbogenstück ab, so geht die lineare Farbmischungseigenschaft verloren. Eine lineare Farbmischung aus *rot* und *violett* müsste nämlich auf die geradlinige Verbindungsstrecke von *rot* und *violett* zu liegen kommen.



Helmholtz und die Folgen

Für die Struktur dieser Arbeit erweisen sich für die Zeit von 1850 bis zur Gegenwart ein anderes Vorgehen und eine Verengung des Blickwinkels als zweckmässig. Helmholtz' Klangfarbentheorie wird als Ausgangspunkt in herkömmlicher Weise mit ausführlichen Zitaten dargelegt. Obschon oder gerade weil immer wieder Bezug auf Helmholtz genommen wird, rechtfertigt sich eine ausführliche Darstellung, denn mehrere Aspekte wie seine unterschiedlichen Ansätze zur spektralen Charakterisierung der gesungenen Vokale und der instrumentalen Klangfarbe, die Problematik der Frequenzabhängigkeit der Lautheitsempfindung, die Hinweise auf die Spektraldynamik und die explizit begrenzte Gültigkeit seiner „Phasenregel“ sind bisher wenig beachtet geblieben.

Die Behandlung der nach der ersten Auflage der *Lehre von den Tonempfindungen* 1863 publizierten Ansätze und Theorien wird, als Auseinandersetzung mit Helmholtz, an zwei Aspekten aufgehängt: die Phasenfrage [Kap. [6](#)] und die räumlichen Modelle und Visualisierung der Klangfarbe [Kap. [7](#)].

Für eine umfassende Untersuchung zur Bedeutung des Einschwingvorgangs für die Klangfarbenempfindung sei auf Reuters [1995] verwiesen. Überlegungen zur Spektraldynamik, den Ausgleichsvorgängen, kommen in Kap. [5.11](#) und im Zusammenhang mit den Klangfarbenräumen in Kap. [7.4](#) und [8.4.3](#) zur Sprache.

Die Phasenfrage hat bis heute nicht an Aktualität verloren, insbesondere wurde noch nie versucht, eine Topologie der Klänge zu entwerfen, die den diesbezüglich relevanten psychoakustischen Effekten Rechnung trägt.

Die Ansätze von Koenig und Thomson als Gegenpositionen zu Helmholtz verdienen eine ausführliche Würdigung und werden auf Basis der Quelltextlektüre dargestellt [Kap. [6.3](#) und Kap. [6.4](#)].

Koenig versucht auf experimentellem Wege die Grenzen der Helmholtz'schen Phasenregel auszuloten, er erfindet und baut zu diesem Zweck als Gegenstücke zu Helmholtz' Stimmgabelsynthesizer zwei andere Typen von Synthesegeräten auf Sirenenbasis. Die Idee der Schablonensirene wird im 20. Jahrhundert von Schouten [1938] auf anderem Wege, als optische Sirene, umgesetzt und verhilft damit dem Nachweis der Periodiktöne [Kap. [6.12](#)]. Erst dadurch werden sie als psychoakustisches Phänomen anerkannt und in ihrem Existenzstatus gleichberechtigt zu den im Gehör entstehenden Obertönen und Kombinationstönen. Für die örtliche Verteilung der Anregungsstellen auf der Basilarmembran bedeutet dies, dass einer einzigen Tonhöhe mehrere Orte zugewiesen werden können. Die Aussage Seebecks, dass mehrere Obertöne zusammen den Grundton verstärken können, wird dadurch bestätigt und Schouten, Ritsma, Cardozo geben 1962 eine Neuformulierung des Ohmschen Gesetzes [Kap. [6.12.1](#)].

Die spektrale Theorie des Klanges kann danach aber nicht mehr durch eine reine Zeittheorie wie bei Euler ersetzt werden. Im Gegenteil, Helmholtz' Theorie einer unvollkommenen Spektralanalyse auf der Basilarmembran ist damit verträglich. Für die Mechanik dieser Spektralanalyse ist die Resonanztheorie, das Harfenmodell, allerdings nur noch eine Metapher, ein Paradigma das einer alternativen Konstruktion des Gehörs durchaus zu Grunde liegen könnte. Bei der durch Békésy festgestellten Wanderwellen in der Innenohrflüssigkeit kommt es im Unterschied zu Helmholtz' Annahme nicht zu stehenden Wellen in gespannten Quersaiten der Basilarmembran, sondern zu einer dynamischen spannungsfreien Verformung. Die Existenz der Residualtöne stellt an eine reine Ortstheorie der Tonhöhenverarbeitung besondere Anforderungen. Wie wird beispielsweise die Periodizität, das grösste gemeinsame Mass mehrerer Teiltonfrequenzen, bei fehlendem Grundton bestimmt, wenn die Zeitstruktur des Signals nicht ausgewertet werden darf?

Ansätze, dem Kosmos der Klänge mit räumlichen Modellen zu begegnen, konnten schon bei Mersenne und Rousseau beobachtet werden. Eine solche Sicht beinhaltet beinhaltet im Minimum die Zerlegbarkeit der Klangfarbe in mehrere von einander unabhängig variierbare Aspekte, das heisst ihre Deutung als Sammelparameter oder multidimensionales Attribut. Der Dimensionsbegriff lässt sich dabei auf die physikalische Beschreibung der Schallsignale am Ort ihrer Entstehung in der Schallquelle, am Trommelfell als Parametrisierung der Wanderwelle in der Cochlea und der dort ausgelösten Nervenreize, oder aber wie in der Psychoakustik üblich auf die beim Hören evozierten Sinneseindrücke beziehen. Aus Sicht des Dimensionsansatzes könnte der Hörvorgang als verstanden gelten, wenn die ganze Übertragungskette mit Hilfe von geometrischen Transformationen zwischen räumlichen Strukturen beschreibbar wäre.

Auch was die Beschreibung physikalischer Schwingungsvorgänge anbelangt, sind in neuerer Zeit verschiedene Verfahren entwickelt worden, welche die klassische Fourieranalyse periodischer Klänge, wie sie von Ohm [1843] erstmals angewendet wurde, nur noch als Spezialfall erscheinen lassen.

Ein Leitgedanke bei der Vorstellung derartiger Ansätze bildet die im Kap. [7.1](#) gegebene räumliche Interpretation von Schönbergs Utopie der Klangfarbenmelodie. Insbesondere wird sie auf ihre Tauglichkeit für einen strukturierten Umgang mit dem Phänomen der Klangfarbe befragt. Im Unterschied zu den Farben hat Helmholtz nie versucht, eine räumliche Deutung der Klangfarbe zu geben, auch nicht in seinen Vorlesungen über die mathematischen Principien der Akustik [Helmholtz 1898]. Eine direkte Beeinflussung Schönbergs durch Helmholtz ist nach heutigem Wissensstand nicht nachweisbar. Denkbar ist eine indirekte Kenntnis Helmholtz'scher Gedanken via Capellen [vermutlich Capellen 1903], die sich mit einer Fussnote Schönbergs in der *Harmonielehre* [Schönberg 1966, 473] begründen lässt.

5. Helmholtz' Klangfarbentheorie

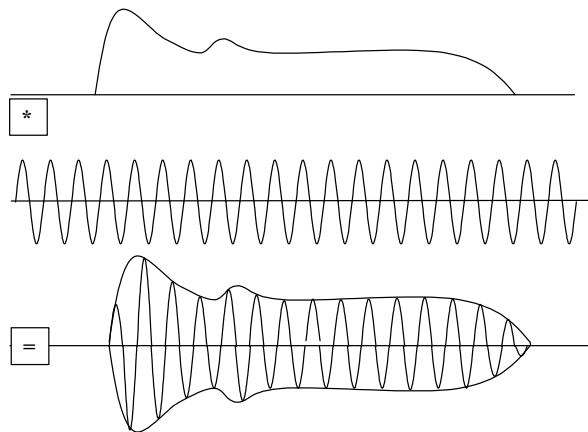
[...] dass die Uebersetzung des Textes von Gesangcompositionen aus einer Sprache in eine andere auch für den rein musikalischen Effect gar nicht gleichgültig sein kann. [Helmholtz 1863]

Helmholtz' *Lehre von den Tonempfindungen* [1863] stellt eine bis zu diesem Zeitpunkt nie dagewesene Synthese der im Brennpunkt dieser Arbeit stehenden Disziplinen dar und wird als Grundstein moderner psychoakustischer Forschung angesehen.

Helmholtz selbst sah den Schwerpunkt seiner Forschung mehr im Gebiet der Sinnesphysiologie und weniger in der Psychologie. Der geschlossene Charakter seiner Theorien – auch im Bereich der *Physiologischen Optik* –, die zugleich auch explizit historisch verankert sind, ist wohl mitverantwortlich dafür, dass in grober Verkürzung ihre Genese sehr oft übergangen wird. Die Kontroverse zwischen Ohm und Seebeck beispielsweise wird häufig einseitig aus Helmholtz' Perspektive beleuchtet und durch ihn selbst als entschieden angesehen. Dabei wird die Neuheit von Seebecks Fragestellungen, wie diejenige der Periodiktöne – Tonempfindungen ohne zugehörige Sinustonkomponenten – verschleiert. Seebecks Fragen sind von einem mathematisch-physikalischen Standpunkt erst dann möglich und sinnvoll, wenn die Sinusschwingungen als Basis der Klangbeschreibung zulässig sind, das heisst, dass die vorkommenden Klänge damit in eindeutiger Weise mit Sinustönen beschrieben werden können. Ohms erstmalige Anwendung der Fourieranalyse auf Klänge beschränkt sich auf den Spezialfall periodischer Funktionen, über den Dirichlets Präzisierung [1826] des Satzes von Fourier abschliessend Auskunft gibt. Helmholtz definiert gar den musikalisch brauchbaren Klang als periodisch. Bis und mit Helmholtz werden in der Regel nur solche periodische Funktionen analysiert, deren Fourierkoeffizienten analytisch bestimmbar sind. Notwendig hierfür ist, dass auch die Schwingungsform analytisch beschreibbar ist. Eine Ausnahme stellt ein Aufsatz von Seebeck [Seebeck, 1844b] dar.

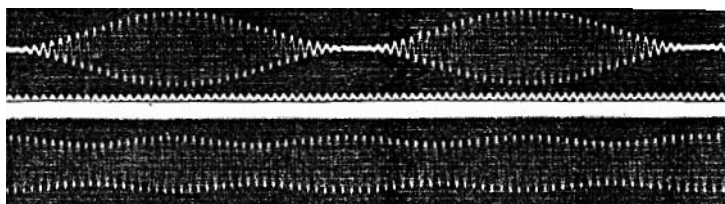
Vor dieser Zeit können Periodiktöne gar keine besonderen Töne sein, denn die Periodizität einer Schwingung definiert den Ton, und die bei Daniel Bernoulli nachweisbare Gleichsetzung von Teiltönen mit Sinustonkomponenten ist mathematisch und psychologisch hypothetisch.

Ohms Definition des Tons lässt über die Dauer eines Tons eine Änderung der spektralen Zusammensetzung zu. Denn ein „wirklicher“ Ton dauert nur eine endliche Zeit – er ist also schon deshalb nicht periodisch – und im Allgemeinen setzt er nicht schlagartig ein und hört auch nicht schlagartig auf, sondern er verklingt allmählich oder wird beim Staccatospiele schnell gedämpft. Aber auch die Tonhöhe, der Isochronismus eines Tons endlicher Dauer, darf gemäss Ohm geringfügig und auch unregelmässig schwanken, ohne dass dadurch die Identität des Tones gefährdet ist. Der Satz von Fourier über periodische Funktionen ist auf diese Situation nicht direkt anwenbar.



Ein realer Ton im Sinne von Ohm ergibt sich als Produkt einer Hüllkurve mit endlichem Träger und einer Sinusschwingung.

Ein periodisch amplitudenmodulierter dauerhafter Sinuston (AM) kann als Überlagerung dreier Sinustöne gedeutet werden, aber auch, wie der Name sagt, als ein einziger Ton, bei dem sich die Amplitude periodisch ändert. Seebeck bringt dieses Beispiel zur „Widerlegung“ des Ohmschen Tonbegriffs. Ein periodisch frequenzmodulierter Sinuston (FM) kann in erster Näherung durch die gleichen drei Sinustöne erzeugt werden, wenn ihre Phasenbeziehungen geeignet verändert werden. Bei einem solchen sogenannten quasi-FM-modulierten Signal ändert die Frequenz periodisch und die Hüllkurve nur wenig.



Oszillogramme zweier Schallsignale mit gleichem Amplitudenspektrum aus drei äquidistanten Teiltönen. Durch Phasenverschiebung eines der drei Töne um $\pi/2$ ($=90^\circ$) entsteht aus dem amplitudenmodulierten Signal oben, das quasi-frequenzmodulierte Signal unten. Diese Signale heißen so, weil sie die erste Näherung an ein frequenzmoduliertes Signal darstellen und ihre Hüllkurve nur wenig schwankt. Echte frequenzmodulierte Signale ohne Hüllkurvenschwankung haben in ihrer Sinustonzerlegung unendlich viele, aber mit zunehmender Entfernung von der Mittelfrequenz rasch abklingende äquidistante Teiltöne. [Quelle: Matthes et al. 1947, 786]

Ein gewöhnliches frequenzmoduliertes Signal, bei dem die Amplitude konstant ist, benötigt hingegen in der Fourierdarstellung unendlich viele Teiltonkomponenten. Bei dauerhaften periodisch modulierenden Signalen wird eine additive Darstellung von Sinustönen der Wahrnehmung nicht gerecht, wenn ein einziger modulierter Ton gehört wird. Schwebungen, AM- und FM-Signale können als Spezialfälle quasi-periodischer Funktionen verstanden werden, eine diesbezügliche mathematische Theorie, wird im zeitlichen Umfeld der Quantenmechanik und Unschärferelation von H. Bohr 1923 aufgestellt. Die Überlegungen von Smith [1749] und Thomson [1877] können als Versuche in diese Richtung auf Basis einer diskreten Theorie angesehen werden.

5.1. Ein Vorläufer: Brandt 1855

Eduard Brandt, Ueber Verschiedenheit des Klanges (Klangfarbe), Poggendorfs Annalen der Physik und Chemie, 112, 1861, 324-336 [Brandt 1855]

Gemäss seiner im Dezember 1860 geschriebenen Fussnote, verfasste Brandt den Aufsatz 1855, um ihn Helmholtz vorzulegen, jedoch ohne direkte Publikationsabsicht. Vier Jahre später veröffentlichte Helmholtz seine Arbeit „Ueber die Klangfarbe der Vokale“ [1859], die möglicherweise durch Brandt angeregt wurde. Durch eine Mitteilung Helmholtz' an Brandt via Prof. Dr. Richelot kommt es 1861 dennoch zu einer Publikation von Brandts Artikel. Da Brandt es „fast für unmöglich halte, jetzt über diese Dinge zu schreiben, ohne sich an Helmholtz anzulehnen“, habe er beschlossen, den Aufsatz „in seiner ursprünglichen Fassung zu lassen“ [Brandt 1855, 324 Fussn.]. Es ist denkbar, dass Bezüge zu Willis, Seebeck und Ohm in Helmholtz' Arbeiten auf Brandt zurückgehen. Ein erster Hinweis auf eigene akustische Versuche Helmholtz' findet sich in einem Brief an du Bois-Reynold vom 8.11.1856 [Kirsten et al. 1986, 166] und gemäss einem Brief vom 18.5.1857, ebenfalls an du Bois-Reymond, war er zu dieser Zeit noch am Sammeln von Material „zur Reform der physiologischen Akustik“ [Kirsten et al. 1986, 169].

Erstmals findet *Klangfarbe* Eingang in den Titel einer Forschungsarbeit: in Klammern. Bis auf eine Nennung in einer Fussnote tritt Klangfarbe sogar immer in Klammern auf. Möglicherweise sind diese Klammerzusätze erst bei der Publikation ergänzt worden und Brandt hat den Begriff Klangfarbe 1855 noch nicht gekannt. Die beiden einleitenden Sätze geben eine Definition der Klangfarbe und fassen die Thesen der Arbeit zusammen:

Ueber die Ursachen, die bei gleicher Tonhöhe und Intensität die Verschiedenheit des Klanges (Klangfarbe) bedingen, steht noch so wenig fest, daß auch der kleinste Beitrag hiezu vielleicht nicht ganz unerwünscht seyn dürfte. Ich meine, daß als Ursache derselben die *Schwingungsform* des tönenden Körpers angesehen werden muß, und daß die Verschiedenheit derselben dem Ohr sich in den *mitklingenden Tönen* (Beitönen) zu erkennen giebt, und ich glaube diese beiden Behauptungen in einem speciellen Falle nachweisen zu können. [Brandt 1855, 324-325]

Bei gleicher Tonhöhe und Intensität ist eine Verschiedenheit des Klanges möglich. Das Objekt, das diese Verschiedenheit des Klanges haben kann, der Träger der Klangfarbe, bleibt dabei ungenannt. Ist es ein Klang oder ein Ton? Jedenfalls muss es eine Tonhöhe haben und hörbar sein. Die Schwingungsform des tönenden Körpers ist die Ursache der Klangfarbe und sie teilt sich dem Ohr über die Partialtöne mit.

Da die Bewegung der das Ohr treffenden Lufttheilchen die Resultante seyn muß der Bewegungen, die sie empfangen von der in unmittelbaren Nähe des tönenden Körpers entstehenden Welle, so sieht man ein, wie eine Verschiedenheit der Schwingungsform von dem Ohr empfunden werden muß. Da ferner jede nach einem Zeitintervall $2T$ periodisch wiederkehrende Bewegung nach der Fourier'schen Reihe zerlegt werden kann in periodische Partial-Bewegungen [...], so darf man, um auch die zweite Behauptung berechtigt zu finden, nur die beiden Hypothesen aufstellen:

1) daß das Ohr im Stande sey, eine periodische Bewegung in ihre isochronen Theilbewegungen zu zerlegen;

2) daß jedem Gliede $A \cdot \sin \frac{t}{T} h \pi$ oder $A \cdot \cos \frac{t}{T} h \pi$ in jener Reihe ein Ton entspreche von der

Schwingungsdauer $\frac{2T}{h}$. [Brandt 1855, 325]

Die „Resultante“: die sich durch additive Überlagerung ergebende Totalbewegung. Sie ist auf den Teilchen als Vektorsumme zu deuten.

Die beiden Hypothesen Brandts besagen, dass das Gehör eine Welle in periodische Partialschwingungen zerlegen kann und dass die hörbaren Teiltöne den Fourierkomponenten entsprechen.

Brandt schreibt keine Klammern um die Argumente der Sinusfunktion. Gemeint ist $A \cdot \sin(\frac{t}{T} h \pi)$, dabei bedeutet t die Zeit und die positive ganze Zahl h ist die Nummer des Teiltönen. Brandt macht in der ganzen Arbeit nicht davon Gebrauch, dass die Summe zweier Ausdrücke $A \cdot \sin(\frac{t}{T} h \pi)$ und $A' \cdot \cos(\frac{t}{T} h \pi)$ als eine einzige Sinus- oder Cosinufunktion der gleichen Frequenz (aber mit anderer Phase) geschrieben werden kann. Es entsteht somit der Eindruck, als ob zwei Töne zur gleichen Frequenz vorkommen könnten oder dass die beiden Formen sich gegenseitig ausschließen. In dem von ihm gerechneten Beispiel kommen nur Sinuskomponenten vor.

Zur Charakterisierung von Klangfarben bieten sich das Fourierspektrum an, das sich bei periodischen Schwingungen aus der Schwingungsform berechnen lässt:

Dieß vorausgesetzt sind in der Zahl der Beitäne, ihrer Intensität, den Verhältnissen ihrer Schwingungszahlen so mannigfaltige Elemente gegeben, daß die Annahme, die Verschiedenheit der Klangfarbe könne zum größeren Theil von der Combination und Aenderung dieser Elemente abhängen, nicht so viel Unwahrscheinliches haben dürfte. [Brandt 1855, 326]

Die Spektren von Stäben, Scheiben und Glocken sind nicht streng harmonisch, deshalb kann hier kein direkter Zusammenhang zwischen Schwingungsform und Spektrum vorliegen, denn bei irrationalen Frequenzverhältnissen ändert die Schwingungsform in jeder Periode des Grundtons. Einen gehörmässig spezifischen Unterschied zwischen periodischen Klängen und nicht periodischen stationären Klängen (mit konstanten Spektrum) erachtet Brandt für möglich:

Zwar liefert die Theorie der elastischen Schwingungen für Stäbe, Scheiben, Glocken etc. andere Beitäne, als für Saiten oder Luftsäulen, und das Ohr findet dieß auch bestätigt und wird gerne einen specifischen Unterschied des Klanges der Körper der ersten und zweiten Gruppe anerkennen, auch eine gewisse Aehnlichkeit des Klanges bei Körpern derselben Gruppe zugeben; aber eine genauere Bestimmung der Beitäne nach Zahl und Intensität, und ihre Abhängigkeit von der Schwingungsform kann, wenigstens für die erste Gruppe, weder die Rechnung liefern, noch dürfte es dem Ohr gelingen, aus dem Gewirre zum Theil vollständig unmusikalischer, irrationaler Intervalle die einzelnen Töne herauszuhören und verschiedene Klänge in Beziehung auf sie zu vergleichen. [Brandt 1855, 326]

Bei den periodischen Schwingungsformen der Saite sind die Spektren materialabhängig:

Beim Vergleichen von verschiedenen Saiten, z.B. Messingsaiten und Darmsaiten, stellt sich auch sehr leicht ein bedeutender Unterschied heraus in Beziehung auf die Intensität dieser Töne; bei letzteren nimmt sie schnell ab, so daß man sie etwa nur bis zu den Tönen 7 bis 8 hören kann, bei ersteren unterscheidet man sie noch deutlich bis 13 etwa, und es scheint fast, als ob die Schwierigkeit, darüber hinaus die Töne zu hören, nicht sowohl in der geringen Intensität derselben ihren Grund hat, sondern mehr in ihrer nahen Aufeinanderfolge, und man möchte diesem Gemisch von hörbaren aber nicht mehr unterscheidbaren hohen Tönen vielleicht nicht mit Unrecht den specifisch „metallischen“ Klang der Saite zuschreiben. [Brandt 1855, 326-327]

Das *Metallische* im Klang der Messingsaite ist in dieser Deutung auf Partialtöne höherer Ordnung, die wegen ihres kleinen Intervallabstands nicht mehr aufgelöst werden können, zurückzuführen. Die gleiche Detung findet sich auch bei Helmholtz [vgl. Kap. 5.9]. Auch bei schwingenden Luftsäulen sind Materialeinflüsse auf die Klangfarbe zu verzeichnen:

An einer Orgel wird man bei Metallpfeifen und Holzpfeifen in Beziehung auf die Intensität der höhern Beitäne einen ähnlichen Unterschied wahrnehmen, wie zwischen Metall- und Darmsaiten (ein Register führt sogar den Namen Quintatoen, weil bei ihm die Quinte vorzugsweise laut mittönt.). [Brandt 1855, 327]

Einen Grund für diesen verschiedenen Klang der Orgelpfeifen bei gleicher Geometrie gibt Brandt nicht.

Bei Vokalen der gleichen festen Tonhöhe ändern die Intensitätsverhältnisse zwischen den Teiltönen je nach Art des Vokals, so

[...] daß bei *a* z.B. die oberen Töne viel deutlicher hörbar sind, als bei *u*. [...] wenn man denselben Ton aushaltend von *u* zu *a* stufenweise ziemlich schnell übergeht, etwa *u*, *o*, *â*, *a*, wo es dann so scheinen wird, als ob neben dem Grundton leise die Intervalle eines Sept-Accordes aufwärts gebrochen mitklingen, was nicht etwa darin seinen Grund hat, daß mit der Aenderung des Vocals die oberen Töne neu hinzutreten, sondern daß sie stärker werden; dieselbe Erscheinung findet statt, wenn man eben so von *a* zu *i* übergeht, etwa *a*, *ae*, *e*, *i*, oder von *u* zu *i*: *u*, *o*, *a*, *e*, *i*. [Brandt 1855, 327]

Es folgt ein Hinweis auf Willis, der Vokaltöne mit Hilfe eines rotierenden Savart'schen Rades (Zahnrad) und einer elastischen Feder synthetisiert habe [Brandt 1855, 327-328] und er interpretiert Willis' Ergebnisse wie folgt:

[...] er hat die einzelnen Beitöne in ihrem Intensitätsverhältniß nicht gehört, sondern nur den Totaleffekt aufgefaßt und ist dabei an die Analogie der Vocale erinnert worden. [Brandt 1855, 328]

Tatsächlich findet sich bei Willis keine Verknüpfung der Klangqualität mit den Obertönen [vgl. Willis 1832: Kap. 4.3.2], allerdings interpretiert dieser die zusammengesetzte Tonerzeugung bei Zungenpfeifen und Zahnrädern als überlagertes, rückgekoppeltes System, was sich einer Deutung mit Teiltönen nicht widersetzt. Das obige Zitat lässt erkennen, dass die Zerlegung in Teiltöne nicht zwingend bewusst vollzogen werden muss.

Brandt ist sich ferner der Schwierigkeit der Fourieranalyse allein durch das Gehör bewusst:

[...] Intensitätsbestimmungen durch das Ohr bei Tönen verschiedener Höhe haben etwas sehr Mißliches, besonders hier, wo es sich um Vergleichung schwacher Töne bei gleichzeitigem Erklängen eines starken handelt und wo die Schwierigkeit also etwa dieselbe ist, als wolle man über die Intensitäten zweier Kerzenflammen im hellen Tageslicht entscheiden. [Brandt 1855, 328]

Die Analogie zur Kerzenflamme erinnert an Mersenne.

Der Rest des Aufsatzes ist der schwingenden Saite gewidmet. Und zwar berechnet Brandt die spektrale Zusammensetzung der Töne einer anfänglich dreiecksförmig ausgelenkten Saite, die losgelassen wird. Die dreiecksförmige Anfangsauslenkung dient als Modell für die gezupfte Saite.

Man kann nämlich bei derselben Saite durch Aenderung ihrer Schwingungsform beliebige der mitklingenden Töne erscheinen und verschwinden lassen, und sich leicht davon überzeugen, daß dadurch der Charakter des Tons (Klangfarbe) sich wesentlich ändert, und die Mittheilung dieser einfachen Erfahrung bildet eigentlich den Zweck dieser Zeilen. [Brandt 1855, 328]

Die Klangfarbe ändert in Abhängigkeit von der Stelle, an der die Saite gezupft oder angeschlagen wird:

Man überzeugt sich nämlich leicht, daß der Klang einer Saite wesentlich verschiedener ist, wenn man sie an verschiedenen Stellen anschlägt oder zupft (aus der Gleichgewichtslage bringt und dann lösläßt, etwa beim Spielen der Harfe). Besonders fällt der hohle gleichsam *leere* Ton auf, den man erhält, wenn man sie gerade in der Mitte, und der scharfe *grelle* Ton, wenn man sie nahe am Ende anschlägt. Wenn man nun aufmerksamer auf diese Verschiedenheit wird, so merkt man, daß bei allmähligem Aendern der Anschlagsstellen verschiedene von den Beitönen stärker oder schwächer werden, an einzelnen Stellen ganz verschwinden, dann aber wieder zum Vorschein kommen. [Brandt 1855, 329]

Als generelle Tendenz ist demzufolge der Gegensatz *hohl* = *leer* und *scharf* = *grell* auf die Entfernung der Anschlagstelle vom Saitenmittelpunkt abzubilden.

Es folgt die Differentialgleichung der Saite und die Berechnung der Fourierkoeffizienten für die dreiecksförmige Anfangsauslenkung (in Ruhe). Für letztere erhält Brandt:

$$C_h = \frac{2\kappa}{\alpha(\pi - \alpha)} \cdot \frac{\sin(h\alpha)}{h^2}. \quad [\text{Brandt 1855, 329-331}]$$

Der Einfachheit der Zahlen halber hat Brandt die Länge der Saite auf die Kreiszahl π normiert, κ ist die Anfangsauslenkung der Saite und h wie oben die Nummer des Teiltöns.

Ferner sind die zugehörigen Teiltöne reine Sinuskomponenten ohne Phasen: $C_h \cdot \sin(\frac{t}{T} h\pi)$.

Nun kann man aber annehmen, daß durch diese Coëfficienten C_h oder ihre Quadrate die Intensitäten der den Schwingungszeiten $\frac{2T}{h}$ entsprechenden Töne gemessen werden. Es folgt also aus dieser Formel

einmal, daß mit wachsendem h C_h sehr schnell abnimmt, weshalb es erklärlich ist, daß von einer gewissen Gränze ab die höhern Töen vom Ohr nicht mehr vernommen werden; sodann, daß für ein kleines α diese Abnahme langsamer erfolgt, als für ein größeres (weil der Zähler $\sin h\alpha$ alsdann für eine ganze Reihe von Tönen mit wachsendem h größer werden kann), woraus der scharfe, grelle Klang herrühren mag, den man hört, wenn man die Saite nahe am Befestigungspunkte greift. (In der That hört man hier neben dem im Verhältniß viel schwächern Grundton die Beitäne schärfer und in größerer Zahl, als mehr nach der Mitte der Saite hin.)

Endlich aber, was uns besonders wichtig ist, da dieß Resultat einer genauen Prüfung unterworfen werden kann, wird

$$C_h = 0, \text{ wenn } \sin(h\alpha) = \pi$$

oder ein Vielfaches von π , und mit C_h wird auch gleichzeitig

$$C_{2h}, C_{3h}, C_{4h}, \dots, C_{ph} = 0,$$

d.h. wenn α , die Entfernung der Anschlagsstelle von Anfangspunkt, ein aliquoter Teil der Saitenlänge ist, diese also in einem Punkte gegriffen wird, der sie theilt in dem rationalen Verhältnisse $m : m_1$, so verschwinden von den Beitänen die den Schwingungszahlen $\mu, 2\mu, 3\mu, \dots, h\mu$ entsprechenden Töne, wenn $m + m_1 = \mu$ ist. Wenn die Saite also in der Mitte gegriffen wird, so verschwinden die den Zahlen 2, 4, 6, 8 ... entsprechenden Töne, und es bleiben nur die den Zahlen 1, 3, 5, 7 ... entsprechenden.

Hauptsächlich aus dem Wegfallen der höheren Octaven ist wohl das eigenthümlich Leere und Hohle des Tons zu erklären; (er füllt sich, wenn man sich von der Mitte entfernt, d.h. die höheren Octaven 2, 4, 6 ... treten hinzu.).

Wird die Saite bei $\frac{1}{3}, \frac{2}{3}$ ihrer Länge gegriffen, so fallen die den Zahlen 3, 6, 9, 12 ... entsprechenden Töne fort und es bleiben hörbar nur 1, 2, 4, 5, 7, 8 und so fort. [Brandt 1855, 331-332]



- 1) wenn die Saite in irgend einem Punkte gegriffen wird, der sie in irgend einem irrationalen Verhältnisse theilt (oder in dem Verhältniß $m : n$, wenn m und n so große Zahlen sind, daß die ihnen entsprechenden Töne nicht mehr gehört werden),
- 2) wenn sie in der Mitte,
- 3) wenn sie bei $\frac{1}{3}, \frac{2}{3}$ ihrer Länge,
- 4) wenn sie bei $\frac{1}{3}, \frac{2}{3}$ ihrer Länge gegriffen wird.

Die mit \circ bezeichneten Töne sind die fortfallenden. [Brandt 1855, 333]

Diese Stelle zeigt neben der sorgfältigen Auswertung der Koeffizientenformel auch Brandts Unsicherheit über die physikalische Deutung der wahrgenommenen Intensität. Ob die Amplitude oder ihre Quadrate zur Bestimmung der Partialintensitäten verwendet werden, hat allerdings Konsequenzen, denn aus der Abnahme der Amplituden wie $\frac{1}{h^2}$ resultiert eine Abnahme der Amplitudenquadrate wie $\frac{1}{h^4}$.

Als Hilfestellung zur gehörmässigen Verifikation seiner Resultate erwähnt Brandt die Möglichkeit als Vergleichsbasis, durch Berühren der Knotenstellen die betreffenden Teiltöne (zusammen mit ihren Frequenzvielfachen) zu isolieren [Brandt 1855, 334].

Am schwersten ist wohl das Unterscheiden der nächst höhern Octave von Grundton, weil man eigentlich keinen Ton ohne dieselbe hört. Wie schwach der Grundton ohne diese Verstärkung ist, kann man aus der Unbestimmtheit des Tones ersehen, den man in der Mitte der Saite erhält, und bei einem einigermaßen tiefen Tone wird das geübteste Ohr in Verlegenheit seyn, wenn die Höhe bestimmt werden soll, während dieß ganz leicht bei jedem andern Anschlagpunkt ist. [Brandt 1855, 334]

Die Bemerkung zur Allgegenwart der Oktave zeigt denn auch die Problematik der Gleichsetzung der Teiltonwahrnehmung mit den Fourierspektren. Ein von der Oktave begleiteter Ton ist in seiner Tonhöhe einfacher bestimmbar als ein reiner Sinuston. Ist er also der bessere Ton einer gegebenen Frequenz?

Am Ende des Aufsatzes kommentiert Brandt den Streit zwischen Ohm und Seebeck. Es handelt sich um eine differenzierte Stellungnahme zu Gunsten von Ohm, wie sie später auch von Helmholtz verfochten wird:

Man wird von vornherein mehr geneigt seyn, O h m Recht zu geben; denn da man zugeben wird, daß ein einziges Glied obiger Form diesen Ton erzeugen würde, so ist nicht einzusehen, wie die Wirkung von 2, 3 oder mehr solchen Gliedern anders als durch Intensitätsverhältnisse von einem Intervall oder Accorde sich unterscheiden sollte, die das Ohr doch in seine einzelnen Töne zerlegt (anders als das Auge, das unter ähnlichen Bedingungen den Eindruck einer Mischfarbe erhält). S e e b e c k dagegen, daß sehr wohl die ganze nach Vielfachen von $\frac{t}{T}$ fortschreitende Reihe einen einfachen Ton erzeugen könne, welcher der Schwingungsdauer $2T$ entspricht, da die ganze Reihe ja ebensogut wie das erste Glied derselben um $2T$ periodisch sey ¹⁾, und sucht dieß daraus zu folgern, daß er diese Töne an der Sirene nicht höre, oder wenn zuweilen, doch so schwach, daß dieß mit Schlüssen unvereinbar sey, die er bei der O h m 'schen Annahme aus anderen Umständen auf ihre Intensität glaubt machen zu müssen. Nun lassen sich aber gegen die Schlüsse erhebliche Einwendungen machen; ich höre außerdem diese Beitäne auch an der Sirene sehr deutlich und kann durch eine einfache Versuchsreihe diese Beitäne beliebig stärker und schwächer hervortreten lassen ²⁾. Ich müßte also entweder annehmen, daß diese Töne an einer schlechten Sirene viel deutlicher vernehmbar seyn müßten, als einer guten, was sehr unwahrscheinlich ist, oder daß ich ein vorzugsweise gutes Gehör haben müßte, was mir leid wäre, weil dann das Interesse an diesen Fragen nur ein sehr vereinzelter und die Hoffnung ihrer Erledigung nur eine sehr geringe seyn würde.

¹⁾ An einer anderen Stelle spricht er auch schon die Vermuthung aus, daß von der Zahl der Glieder und den Werthen der Constanten die Klangfarbe abhängen könne; doch würde er meine Vermittlerrolle und die Behauptung, daß *beide Recht haben*, wohl zurückgewiesen haben.

²⁾ Wenn man nämlich die einen Ton bildende Löcherreihe einer Sirene in gleichen Intervallen unterbricht (indem man z.B. einzelne Löcher verklebt), so erscheint neben dem ursprünglichen Ton ein tieferer, dessen Schwingungsdauer der Zahl der Unterbrechungen entspricht, mit seinen Nebentönen. Dauert die Unterbrechung nur kurz, so ist der Grundton fast nicht zu hören, sondern nur die höhern Beutöne; vergrößert man die Dauer der Unterbrechungen, so nimmt die Intensität der Beutöne ab, und der Grundton tritt deutlicher hervor. [Brandt 1855, 335-336]

Von besonderem Interesse sind die beiden Fussnoten. Der von Brandt angesprochene Zusammenhang zwischen der spektralen Zusammensetzung und der Klangfarbe findet sich so nicht bei Seebeck, hingegen wiederholt der Hinweis auf die Abhängigkeit der Klangfarbe von der Schwingungsform. Es war Seebecks Absicht zu zeigen, dass auch nicht sinusförmige Schwingungen zu einer obertonfreien Tonwahrnehmung führen können und dass in dieser Variabilität der Elementartöne die Unterschiede der Klangfarbe begründet sind. Solche Elementartöne können sich in ihrem Fourierspektrum unterscheiden. Deshalb ist für Seebeck die Gleichsetzung der wahrgenommenen Teiltonintensitätsverhältnisse mit dem Amplitudenspektrum unzulässig.

Die Schlüsse, die Seebeck „bei der Ohm'schen Annahme aus anderen Umständen auf ihre Intensität glaubt machen zu müssen“, sind in Wahrheit eine differenzierte Untersuchung periodischer Impulsfunktionen unter Verwendung der Fourieranalyse: Bei der Sirene kann der Grundton nicht entsprechend den Amplitudenverhältnissen bzw. ihren Quadraten dominieren. Es geht dabei nicht um einen Vergleich zwischen Sonnenlicht und Kerzenschein, denn je nach Impulsform und Dauer der Impulse im Vergleich zur Periodizität können gemäss Seebecks Analyse höhere Teiltöne stärker als der Grundton werden.

Die zweite Fussnote ist ganz im Sinne Seebecks und entspricht seinen eigenen Versuchen mit mehreren Systemen isochroner Impulse.

5.2. Helmholtz 1857

Ueber die physiologischen Ursachen der musikalischen Harmonien, 1857, hg. Fritz Krafft, Kindler, München 1971 (nach "Vorträge und Reden von Hermann von Helmholtz" 4. Aufl., Vieweg, Braunschweig 1896, Bd. 1, S. 119–155 [Helmholtz 1857])

Schon sechs Jahre vor der Erstauflage seiner Lehre von den Tonempfindungen bringt Helmholtz in einem seiner „populären Vorträge“ das Thema Klangfarbe zur Sprache und illustriert den Begriff anhand von Wasserwellen:

Sie sehen, dass die Länge der Wellen mit der Höhe des Tones zusammenhängt; ich füge hinzu, dass die Höhe der Wellenberge oder, auf die Luft übertragen, die Stärke der abwechselnden Verdichtungen und Verdünnungen, der Stärke und Intensität des Tones entspricht. Aber die Wellen von gleicher Höhe können auch eine verschiedene Form haben. Die Gipfel ihrer Berge können z. B. abgerundet oder spitz sein. Entsprechende Verschiedenheiten können auch bei Schallwellen von gleicher Tonhöhe und Stärke vorkommen; bei ihnen ist die Klangfarbe das, was der *Form* bei den Wasserwellen entspricht. [Helmholtz 1857, 20–21]

Die genaue Form der Schallwellen könne erst in wenigen Fällen berechnet werden:

Bisher können wir leider erst in sehr wenigen Fällen Rechenschaft von den Formen der Schallwellen geben, die den Klangfarben verschiedener tönender Körper entsprechen. Unter den Schallwellen, die wir genauer zu bestimmen vermögen, ist eine Form von grosser Wichtigkeit, welche wir die *einfache* oder *reine* Wellenform nennen können [Helmholtz 1857, 21]

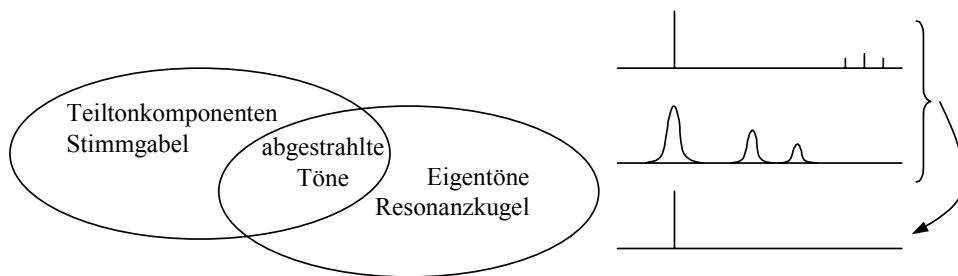
Es sind dies die sinusförmigen Wellen. Diese *einfachen Wellen* nennt Helmholtz in Bezug auf ihre Klangfarbe *einfache Töne* und er sagt auch wie sie erzeugt werden können:

Dieser einfachen Wellenform entspricht eine Art von Tönen, die wir aus nachher anzuführenden Gründen, in Bezug auf ihre Klangfarbe *einfache Töne* nennen wollen. Solche Töne erhalten wir, indem wir eine angeschlagene Stimmgabel vor die Mündung einer gleichgestimmten Resonanzröhre halten. Auch scheint der Ton klangvoller menschlicher Stimmen, welche in ihren mittleren Lagen den Vocal *U* singen, sich nicht weit von dieser Wellenform zu entfernen.

Dieser einfachen Wellenform entspricht eine Art von Tönen, die wir aus nachher anzuführenden Gründen, in Bezug auf ihre Klangfarbe *einfache Töne* nennen wollen. Solche Töne erhalten wir, indem wir eine angeschlagene Stimmgabel vor die Mündung einer gleichgestimmten Resonanzröhre halten. Auch scheint der Ton klangvoller menschlicher Stimmen, welche in ihren mittleren Lagen den Vocal *U* singen, sich nicht weit von dieser Wellenform zu entfernen.

Ausserdem kennt man die Bewegungsgesetze der Saiten genau genug, um in einigen Fällen die Bewegungsform, die sie der Luft mittheilen, bestimmen zu können. [Helmholtz 1857, 22]

Stimmgabeltöne sind keine reinen Sinustöne, die gleichgestimmte Resonanzröhre verstärkt aber – als Filter – nur die Grundfrequenz, falls die Schnittmenge der Eigenfrequenzen von Stimmgabel und Resonator nur die beiden gemeinsame Grundschwingung enthält.

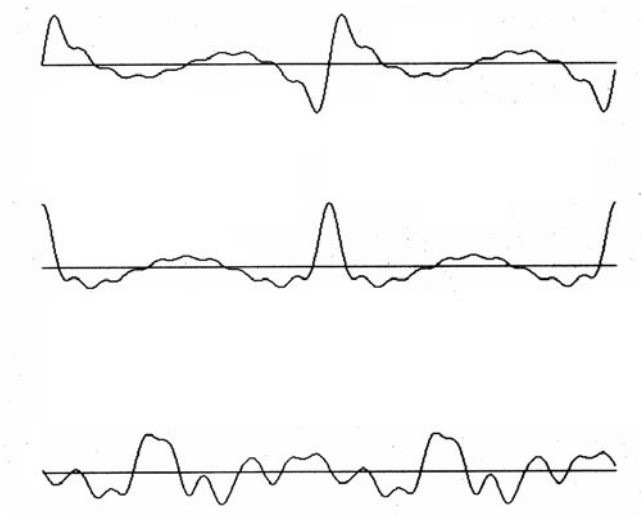


Wenn in der Schnittmenge der Töne der Stimmgabel und der Menge der Eigentöne der Resonanzkugel nur eine einzige Frequenz übrig bleibt, strahlt dieses Instrument einen guten Sinuston ab.

Die Schwingungsformen scheinen in einer einfachen Korrespondenz zu den zugehörigen Klangempfindungen zu stehen:

Solchen Verschiedenheiten der Tonwellenform entspricht also die Verschiedenheit der Klangfarbe; ja wir können den Vergleich noch weiter treiben. Je gleichmässiger gerundet die Wellenform ist, desto weicher und milder die Klangfarbe; je abgerissener und eckiger die Wellenform, desto schärfer der Klang. Die Stimmgabeln mit ihrer rundlichen Wellenform [...], haben einen ausserordentlich weichen Klang, der Klang von Zither und Violine zeigt ähnliche Schärfe wie ihre Wellenformen [...]. [Helmholtz 1857, 24]

Runde weiche Schwingungsformen gehören zu weichen und milden Klangfarben, eckige abgerissene Schwingungsformen dagegen zu scharfen Klangfarben. Von dieser einfachen geometrisch inspirierten Korrespondenz ist Helmholtz später abgekommen, da die genannten Formeigenschaften durch Veränderung der Teiltonphasen beeinflusst werden können. Der Schluss ist nur in einer Richtung zulässig: Beim Vorliegen von Knicken, steilen Flanken etc. wie in Dreiecks- oder Rechtecksschwingungen kann auf eine hohe Zahl von Teiltönen und damit – wenn Schärfe, wie Helmholtz dies tut, mit dem Auftreten von Teiltönen hoher Ordnungszahl assoziiert wird – auf einen scharfen Klang geschlossen werden. Eine hohe Zahl von Teiltönen produziert aber umgekehrt nicht zwingend solche geometrische Auffälligkeiten in der Schwingungsform, vor allem dann nicht, wenn die Nullphasen der einzelnen Teiltöne stark variieren.



Die drei Zeitfunktionen haben alle dasselbe Amplitudenspektrum aus 9 Teiltönen mit Partialamplituden $a_n = 1/n$, aber fehlendem Grundton. Die Grundschiwingung ist in den beiden oberen Verläufen als negatives „Nachbild“ erkennbar. Beim oberen sind alle Teiltöne in Sinuslage (\rightarrow maximal steile Flanke), beim mittleren sind sie alle in Cosinuslage (\rightarrow maximale Auslenkung von der Nulllage) und beim unteren, sind die Phasen für alle Teiltöne verschieden. Der unterste Verlauf kreuzt die Nulllage häufiger, und die Periodizität ist von Auge schlechter erkennbar als bei den beiden oberen.

Bereits in diesem Vortrag setzt Helmholtz das Theorem von Fourier in Beziehung zur Schallverarbeitung in der Cochlea [Helmholtz 1857, 31–33]. Die Basilarmembran wird als Resonanzsystem ähnlich der Gesamtheit der ungedämpften Saiten eines Klaviers gedeutet:

Stellen wir weiter die Vermuthung auf [...], dass jedes solche Anhängselchen, ähnlich den Saiten des Claviers, auf einen Ton abgestimmt ist, so sehen Sie nach dem Beispiel des Claviers, dass nur wenn dieser Ton erklingt, das betreffende Gebilde schwingen und die zugehörige Nervenfasern empfinden kann, und dass die Gegenwart jedes einzelnen solchen Tones in einem Tongewirr auch stets durch die entsprechende Empfindung angezeigt werden muss.

Das Ohr kann also, der Erfahrung nach, zusammengesetzte Luftbewegungen in ihrer Theile zerlegen. [Helmholtz 1857, 33]

Die Metapher des Klaviers für die Schallverarbeitung in der Cochlea findet sich schon bei de Mairan [1737, 10; vgl. Kap. 3.1.4].

Die Unterscheidung in synthetische und analytische Wahrnehmung von Klängen wird auf die Begriffe *Empfindung* und *Vorstellung* (später *Wahrnehmung*) zurückgeführt, die den physischen und geistigen Aspekt der Klangverarbeitung zum Ausdruck bringen. Hinsichtlich der Verarbeitung der zusammengesetzten Wellen fragt Helmholtz:

Was thut nun das Ohr, löst es sie auf, oder fasst es sie als Ganzes? – Die Antwort darauf kann nach dem Sinne der Frage verschieden ausfallen, denn wir müssen hier zweierlei unterscheiden. Erstens die *Empfindung* im Hörnerven, wie sie sich ohne Einmischung geistiger Thätigkeit entwickelt; zweitens die *Vorstellung*, welche wir uns bilden in Folge dieser Empfindung. Wir müssen also gleichsam unterscheiden: das leibliche Ohr des Körpers und das geistige Ohr des Vorstellungsvermögens. Das leibliche Ohr thut immer genau dasselbe, was der Mathematiker thut mittelst des *Fourier'schen* Satzes [...]: es löst die Wellenformen, welche nicht, wie die Stimmgabeltöne, schon ursprünglich der einfachen Wellenform entsprechen, in eine Summe von einfachen Wellen auf [Helmholtz 1857, 36-37]

Das „leibliche Ohr“ erledigt auf mechanische Weise die Fourierzerlegung und weist dabei die gefundenen Teiltonfrequenzen bestimmten Stellen auf der Basilarmembran zu, die dadurch in Resonanz geraten, da diese Stellen Eigenfrequenzen der Cortischen Fasern entsprechen.

Es lehrt nämlich sowohl die Erfahrung am Claviere, als auch die mathematische Theorie für alle mittönenden Körper, dass nicht bloss der Grundton, sondern ebenso die vorhandenen Obertöne des

erregenden Tones das Mitschwingen bewirken. Daraus folgt, dass auch in der Schnecke des Ohres jeder äussere Ton nicht bloss das seinem Grundton entsprechende Plättchen und die zugehörigen Nervenfasern in Mitschwingung setzen, sondern dass er auch diejenigen Theile, welche den Obertönen entsprechen, erregen wird, so dass letztere ebenso gut empfunden werden müssen als der Grundton. [Helmholtz 1857, 40]

Ein einfacher Ton, das heisst ein Ton ohne Obertöne, hat genau eine Resonanzstelle auf der Basilarmembran, und eine einzige Resonanzstelle kommt nur vor, wenn die verursachende Schallwelle sinusförmig, das heisst eine einfache oder reine Welle im Sinne von Helmholtz ist.

Danach ist ein einfacher Ton ein solcher, der durch einen Wellenzug von der reinen Wellenform erregt wird. Alle anderen mehrfachen Tonempfindungen, wie sie von den meisten musikalischen Instrumenten hervorgebracht werden, sind von anderen Wellenformen erregt. Daraus folgt, dass, streng genommen, für die Empfindung alle Töne der musikalischen Instrumente als Accorde mit vorwiegendem Grundton zu betrachten sind. [Helmholtz 1857, 40]

Die Töne der musikalischen Instrumente bestehen in der Regel aus einer Vielzahl von einfachen Tönen, das heisst es werden gleichzeitig mehrere Zonen der Basilarmembran in unabhängige Schwingungen versetzt. Insofern besteht nur ein gradueller Unterschied zwischen Akkorden und Tönen. Die Dominanz des Grundtons im Fourierspektrum wird hier von Helmholtz – im Unterschied zu Helmholtz 1863 – noch als zwingend für musikalische Töne angesehen. Es ist eine Leistung der *Vorstellung* aus dem Anregungsmuster auf der Basilarmembran, das die *Empfindung* repräsentiert, einen musikalischen Ton zu erzeugen.

Der Aufsatz von 1857 verweist auch schon auf die Formanttheorie der Vokale inklusive Notendarstellung der Formanten [Helmholtz 1857, 45, vgl. Warren, Warren 1968, 25-58 für eine Wiedergabe in englischer Sprache]

5.3. Ton, Klang, Klangfarbe

Ueber die Klangfarbe der Vocale, Annalen der Physik und Chemie, Band CVIII, Leipzig 1859, 280-290 [Helmholtz 1859]

Die Lehre von den Tonempfindungen als physiologische Grundlage für die Theorie der Musik, Vieweg, Braunschweig 1863 [Helmholtz 1863]

Die wesentlichen Elemente von Helmholtz' Klangfarbentheorie sind bereits 1859 in knapper Form vorgezeichnet. Die beiden Quellen werden zu Beginn dieses Abschnittes parallel verfolgt.

Helmholtz' Verwendung des Begriffs *Klang* entspricht derjenigen von Koch. Im Unterschied zu Koch erhält auch *Ton* eine handfeste physikalische Interpretation als hörbare Sinusschwingung, und zur Reduktion der Mehrdeutigkeit des Begriffs verwendet ihn Helmholtz nicht für die *Tonhöhe* [vgl. auch Helmholtz 1863, 39]:

Ich habe deshalb auch früher schon vorgeschlagen, die ganze zusammengesetzte Empfindung, wie sie die von einem einzelnen tönenden Körper ausgehende Luftbewegung erregt, mit dem Namen *Klang* zu bezeichnen, den Namen des *Tons* aber zu beschränken auf die einfache Empfindung, wie sie durch eine einfache pendelartige Luftbewegung hervorgebracht wird. Die Empfindung eines Klanges ist demnach in der Regel aus der Empfindung mehrerer einfacher Töne zusammengesetzt. [...] Diese Bezeichnung wollen wir im Folgenden beibehalten, und dabei festsetzen, daß unter Tonhöhe eines Klanges die Höhe des tiefsten darin enthaltenen einfachen Tones von n Schwingungen, seines

Grundtons oder *ersten Tons* verstanden werde, während wir die übrigen als Obertöne bezeichnen. Den Ton von $2n$ Schwingungen, die höhere Octave des vorigen bezeichne ich als *zweiten Ton*, den von $3n$ Schwingungen als *dritten Ton* u. s. w. [Helmholtz 1859, 282-283]

Ein *Ton* ist der von einer einer Pendelschwingung, das heisst von einer Sinusschwingung, verursachte Höreindruck und er hat eine *Tonhöhe*. Die Sinusschwingung ist definitionsgemäss *einfach*. Ein *Klang* ist der Höreindruck zu einer beliebigen periodischen Luftbewegung. Ein Klang besteht in der Regel aus mehreren, additiv überlagerten Teiltönen. Die *Tonhöhe eines Klanges* ist als Tonhöhe seines tiefsten Teiltöns definiert.

Es ist zuerst von G. S. Ohm ausgesprochen und behauptet worden, dass es nur eine einzige Schwingungsform giebt, deren Klang keine harmonischen Obertöne enthält, deren einziger Bestandtheil also der Grundton ist. [...] Wir wollen sie die *pendelartigen Schwingungen* nennen, oder da ihr Klang keine weitere Zusammensetzung aus verschiedenen Tönen hören läßt, die *einfachen Schwingungen*. [Helmholtz 1863, 38]

Die Stelle scheint auf den ersten Blick tautologisch, denn wenn eine periodische Schwingung nicht sinusförmig ist, hat sie in der Fourierzerlegung mindestens zwei nicht verschwindende Komponenten und damit mindestens einen Oberton. Wenn aber mit harmonischen Obertönen hörbare Obertöne gemeint sind, ist die Behauptung aus Seebecks Sicht unrichtig, da die Beimischung von unhörbaren Teiltönen die Schwingungsform in nicht wahrnehmbarer Weise modifiziert.

Ziel von Helmholtz' Arbeit zur Klangfarbe der Vokale ist es, die „Consequenzen des Ohm'schen Satzes für die Lehre der Klangfarbe zu untersuchen“ [Helmholtz 1859, 283]

In physikalischer Beziehung war man längst zu der Erkenntniß gelangt, daß dem, was unser Ohr als verschiedene Klangfarbe unterscheidet, die verschiedene Form der Luftwellen innerhalb jeder einzelnen Schwingungsperiode entspräche; aber freilich beruhte dieser Satz nur darauf, daß keine andere Möglichkeit übrig blieb, die Verschiedenheit der Klangfarbe zu erklären, und bedurfte noch der experimentellen Bestätigung, die durch meine Versuche nun gegeben werden kann. [Helmholtz 1859, 282-283]

Und in der *Lehre von den Tonempfindungen* heisst es:

Indem die Physiker diese Curvenform im Sinne haben, welche das Gesetz des tönenden Körpers darstellen, sprechen sie denn auch gerade von der *Schwingungsform* eines tönenden Körpers, und behaupten, dass von *dieser Schwingungsform* die *Klangfarbe* abhängt. Diese Behauptung [...] wird sich in so weit als richtig erweisen, dass jede verschiedene Klangfarbe verschiedene Schwingungsform verlangt, dagegen verschiedene Schwingungsformen gleicher Klangfarbe entsprechen können. [Helmholtz 1863, 36]

Mit den genannten Physikern könnten Euler, Seebeck und eventuell Brandt gemeint sein. Ein Bezug auf Daniel Bernoulli scheint unwahrscheinlich.

Die Korrespondenz zwischen Klangfarbe und Schwingungsform wäre somit nichts Neues.

Unter Klangfarbe verstehen wir diejenige Eigenthümlichkeit, wodurch sich der Klang einer Violine von dem einer Flöte, oder einer Clarinette, oder menschlichen Stimme unterscheidet, wenn alle dieselbe Note in derselben Tonhöhe hervorbringen. [Helmholtz 1863, 20]

Und an anderer Stelle heisst es:

Wenn wir nun fragen, welcher äusseren physikalischen Verschiedenheit der Schallwellen die verschiedenen Klangfarben entsprechen, so haben wir gesehen, dass die Weite der Schwingung die Stärke, die Dauer der Schwingung der Tonhöhe entspricht. Von beiden kann die Klangfarbe nicht abhängig sein. Dann bleibt keine andere Möglichkeit übrig, als dass die Klangfarbe abhängt von der Art und Weise, wie die Bewegung innerhalb jeder einzelnen Schwingungsperiode vor sich geht. Wir

haben zur Erzeugung eines musikalischen Klanges von der Bewegung des tönenden Körpers nur gefordert, dass sie periodisch sei [...] Welche Art von Bewegung innerhalb jeder einzelnen Periode vor sich geht, war ganz beliebig geblieben [...]. [Helmholtz 1863, 31-32]

5.4. Das Ohr als Frequenzanalysator

Als Konsequenz in „physiologischer Beziehung“ aus „Ohm's Satze“ [Helmholtz 1859, 283] ergibt sich, dass eine Veränderung der Klangfarbe bei gleichbleibender Tonhöhe stets von einer Veränderung der Stärkenverhältnisse der Obertöne verursacht wird, das heisst, dass die Phasenverhältnisse für die Klangfarbenempfindung keine Rolle spielen. Wenn nämlich die einen Klang konstituierenden Teiltöne unkorreliert übertragen werden, können verschiedene Phasenrelationen vom Gehör nicht unterschieden werden:

Da nämlich alle Schwingungen die nicht der einfachen pendelartigen Bewegung entsprechen, in der Empfindung des Ohres zerlegt werden in eine gewisse Zahl einfacher Töne, so müssen Klänge von verschiedener Klangfarbe und gleicher Höhe des Grundtons für das Ohr durch verschiedene Stärke der harmonischen Obertöne verschieden seyn. Wenn wir nun absehen von der verschiedenen Weise, wie die Klänge verschiedener Instrumente und Stimmen anheben oder ausklingen, ferner von den mancherlei sausenden, kratzenden, knarrenden, unregelmässigen Geräuschen, welche viele davon begleiten, und die nicht eigentlich zu dem musikalischen Theile des Tones zu rechnen sind, und den Theil der Klangfarbe, der eben nicht von den genannten Nebenumständen abhängt, die musikalische Klangfarbe des Tons nennen, so war die aufzustellende Frage: *Unterscheidet sich die musikalische Klangfarbe nur durch die verschiedene Stärke der darin enthaltenen Nebentöne?*

Denkt man eine Wellenform aus den in ihr enthaltenen einfachen Wellen zusammengesetzt, so kommt es nicht nur darauf an, daß die letzteren die richtige Schwingungsweite haben, sondern auch darauf, daß die Phasenunterschiede zwischen ihnen und dem Grundtone richtig gewählt werden. Wir bekommen ganz verschiedene Wellenformen, wenn wir die Welle eines Grundtons mit seiner ersten höheren Octave zusammensetzen, je nachdem wir das Verdichtungsmaximum des Grundtons mit dem der Octave zusammenfallen lassen, oder etwa mit dem Verdichtungsminimum der Octave, und es concentrirte sich nun jene Frage in folgende speciellere Form: *Beruhet die Unterscheidung der musikalischen Klangfarbe nur in der Empfindung von Obertönen verschiedener Stärke, oder unterscheidet das Ohr auch Phasenunterschiede?* [Helmholtz 1859, 283-284]

Die zitierte Stelle verfeinert gleichzeitig den Begriff der Klangfarbe, indem die *musikalische Klangfarbe* von Ein- und Ausschwingvorgängen sowie von Begleitgeräuschen abstrahiert. Eine positive Bestimmung des Begriffs der Klangfarbe liegt der Arbeit zu den Vokalen nicht zu Grunde, sie könnte sich aber aus der Beantwortung der beiden hervorgehobenen logisch äquivalenten Fragen ergeben: Die musikalische Klangfarbe ist durch das Amplitudenspektrum bestimmt.

Die von Helmholtz postulierte mechanische Fourierzerlegung auf der Basilarmembran dient einerseits als Erklärung der Klangfarbe, andererseits stellt sich ihm die Frage nach dem Sinn einer solchen Zerlegung:

Da nun die Klangfarbe [...] von der Schwingungsform abhängt, von derselben Schwingungsform aber auch das Vorkommen der Obertöne bestimmt wird, so werden wir die Frage aufwerfen müssen, in wie fern die Unterschiede der Klangfarbe etwa auf verschiedenartigen Verbindungen des Grundtons mit verschieden starken Obertönen beruhen. Es bietet sich uns durch diese Fragestellung ein Weg dar, um den Grund des bisher vollkommen räthselhaften Wesens der Klangfarbe aufhellen zu können. Dann aber müssen wir auch nothwendig die Frage zu lösen versuchen, wie denn das Ohr dazu komme, jeden Klang in eine Reihe von Theiltönen zu zerlegen, und welchen Sinn diese Zerlegung habe. [Helmholtz 1863, 39]

An dieser Stelle wäre ein Hinweis auf Brandt möglich, Brandts Aufsatz ist ja inzwischen publiziert. Und dort ist der Zusammenhang zwischen Schwingungsform, Fourierspektrum und Klangfarbe im Sinne von Helmholtz vorweggenommen – und Helmholtz kennt diesen Text! Die Sinnfrage führt durch ihren Bezug zur Gehörphysiologie über die bisherigen Theorien und Theorieansätze zur Klangfarbe hinaus. Mit dem Sinn der Zerlegung meint Helmholtz ihr Sinn für die menschliche Kommunikation und die Interpretation der Umwelt [s. u.].

Da gemäss Helmholtz eine gehörmässige Zerlegung eines Klages mit multipltem Frequenzverhältnis aus mehreren Schallquellen möglich ist, muss dies auch für Klänge aus einer einzigen Schallquelle möglich sein:

Die Erfahrung lehrt, dass, wenn zwei Stimmgabeln in der Octave oder Duodecime zusammenklingen, das Ohr sehr wohl im Stande ist, ihre Töne von einander zu scheiden, wenn auch diese Scheidung etwas schwieriger ist als bei anderen Intervallen. Wenn aber das Ohr im Stande ist, einen solchen Zusammenklang zweier Stimmgabeln aufzulösen, so wird es nicht umhin können, dieselbe Analyse auch auszuführen, wenn dieselbe Luftbewegung durch eine einzige Flöte oder Orgelpfeife hervorgebracht wird. [...]

Die Auflösung eines einzelnen Klages in eine Reihe von Partialtönen beruht also auf derselben Fähigkeit des Ohres, vermöge deren es im Stande ist, verschiedene Klänge voneinander zu trennen, und es wird in beiden Fällen die Scheidung ausführen müssen nach einer Regel, die gar nicht darauf Rücksicht nimmt, ob die Schallwellen aus einem oder mehreren Tonwerkzeugen hervorgegangen sind. [Helmholtz 1863, 54]

Eine Hauptschwierigkeit bei der erwähnten Analyse zur Identifizierung mehrerer Schallquellen besteht darin, dass diese Analyse nicht bis auf die Sinustonbasis durchgeführt werden darf, wenn Zusammenklänge aus je teiltonhaltigen Instrumentaltönen wie Violine und Trompete auseinanderzuhalten sind. Dies ist besonders dann problematisch, wenn die beiden Töne die gleiche Grundfrequenz haben. (Die räumliche Position der Schallquellen ist bei ihrer Ortung nicht zu vernachlässigen. Diese basiert auf dem Zusammenspiel beider Ohren und gehört somit zu neurophysiologischen Vorgängen, die nicht mit der Mechanik der Basilarmembran erklärt werden können.)

Es ist nur eine Frage der Übung, bis die Wahrnehmung nicht mehr der objektiven Zusammensetzung des Schalls in Sinusbestandteile widerspricht. Die folgende Bemerkung allgemeiner Art differenziert zwischen dem physiologischen und dem psychologischen Aspekt der Klangverarbeitung:

Die Obertöne sind nämlich ein Phänomen, welches der reinen *Empfindung* des Ohres angehört; die Zusammenfassung einer Reihe von Partialtönen zu einem Klage, wie er irgend einem bestimmten Tonwerkzeuge zukommt, ist ein Vorgang, welcher in das Gebiet nicht der Empfindung, sondern der *Wahrnehmung* fällt. [...] *Empfindungen* nennen wir die Eindrücke auf unsere Sinne, insofern sie uns nur als Zustände unseres Körpers (speciell unserer Nervenapparate) zum Bewusstsein kommen; *Wahrnehmungen*, insofern wir aus ihnen die Vorstellung äusserer Objecte bilden. Wenn wir einen gewissen Schall auffassen als den Klang einer Violine, so ist dies eine Wahrnehmung, wir schliessen auf die Existenz eines bestimmten Tonwerkzeuges, welches derartige Klänge hervorzubringen pflegt. Wenn wir aber diesen Klang in seine Partialtöne zu zerlegen suchen, so ist dies Sache der reinen Empfindung. [Helmholtz 1863, 101]

Eine ständig bewusstgemachte Fourieranalyse wäre der Deutung der Aussenwelt und der menschlichen Kommunikation abträglich:

beim alltäglichen Gebrauche des Ohres [...] haben unsere Sinnesempfindungen für uns nur insofern Werth, als wir mit ihrer Hilfe die Vorgänge in der uns umgebenden Aussenwelt ermitteln können. Zu letzterem Zwecke genügt aber die richtige Auffassung der Klänge; die Trennung derselben in Partialtöne, wenn wir uns ihrer bewusst würden, würde nicht nur nichts helfen, sondern auch ausserordentlich störend sein. [Helmholtz 1863, 101]

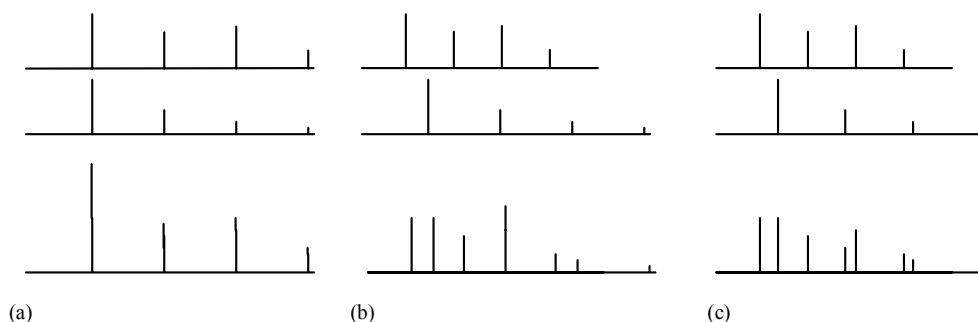
Die „richtige Auffassung“ genügt: Die Fourieranalyse durch das Gehör vorausgesetzt ist also die Integrationsleistung auf höherer Ebene zu hinterfragen. Weshalb wird der auf der Basilarmembran zergliederte Geigenton vom Bewusstsein als Einheit registriert? Die Zerlegung ist keine Analyse, die übersprungen werden kann. Denn sie ist, da sie von den Phasenrelationen abstrahiert, gleichzeitig eine Klassifikation der Sinnesreize. Helmholtz erklärt die Syntheseleistung des Gehirns wie folgt:

Wenn der Schall einer Violine, so oft wir ihn gehört haben, in unserem Ohre immer und immer wieder dieselbe Summe von Partialtönen zur Empfindung gebracht hat, so wird diese Summe von Tönen in unserer Empfindung endlich das zusammengesetzte Zeichen für den Klang einer Violine, eine andere Combination von Partialtönen wird das sinnliche Zeichen für den Klang einer Clarinette u. s. w. Je öfter eine solche Combination gehört worden ist, desto mehr sind wir gewöhnt, sie als zusammenhängendes Ganzes aufzufassen, und desto schwerer ist es, sie durch unmittelbare Beobachtung zu analysieren. [...] Dergleichen Verschmelzungen mehrerer Empfindungen zu einem einfachen Ganzen bewusster Wahrnehmung kommen im Gebiete aller unserer Sinnesorgane vor. [Helmholtz 1863, 105]

Er vertritt also eine Art *pattern-recognition*-Ansatz, wonach immer wieder dargebotene zusammengesetzte Erregungsmuster zu wiedererkennbaren Einheiten der Wahrnehmung verschmelzen. Die gehörmässige Analyse von Zusammenklängen mehrerer Instrumentaltöne nimmt diese Pattern als Basis, und nicht etwa die zu Grunde liegenden Sinusbausteine:

Die gewöhnliche Aufgabe, welche unser Ohr beim Zusammentreffen mehrerer Klänge zu lösen hat, ist die, die einzelnen Klänge, welche den einzelnen tönenden Körpern oder Instrumenten angehören, von einander zu scheiden; nur soweit hat die Analyse durch das Ohr objectives Interesse. Wir wünschen zu wissen, wenn mehrere Menschen durcheinander sprechen, was jeder Einzelne sagt, wenn mehrere Instrumente und Stimmen zusammenwirken, welche Melodie eine jede Einzelstimme ausführt. Die weitere Analyse dagegen, wodurch die einzelnen Klänge in ihre Theiltöne zerlegt werden, obgleich sie durch dieselben Mittel und dieselben Fähigkeiten des Ohres ausgeführt werden kann, wie jene erste, würde uns nichts Neues mehr lehren [...]: Deshalb beschränken wir die Richtung unserer Aufmerksamkeit gewöhnlich auf die Zerlegung der Klangmasse in Klänge der einzelnen Instrumente, und halten sie gleichsam zurück von der weiteren Zerlegung der Klänge in Töne. Ebenso geübt, wie wir daher in dem ersteren Geschäfte sind, ebenso ungeübt sind wir in dem letzteren. [Helmholtz 1863, 107]

Für eine solche partielle Zerlegung einen physiologisch-psychologischen Mechanismus zu finden, ist nicht einfacher als für eine vollständige Zerlegung in „einfache“ Töne. Wie werden unter Voraussetzung der vollständigen Analyse zusammengesetzte Klänge bei der höheren Verarbeitung wieder richtig gruppiert, wenn als Eingangsdatum nur zwei überlagerte Nadelnspektren und das zugehörige Anregungsmuster zur Verfügung steht?



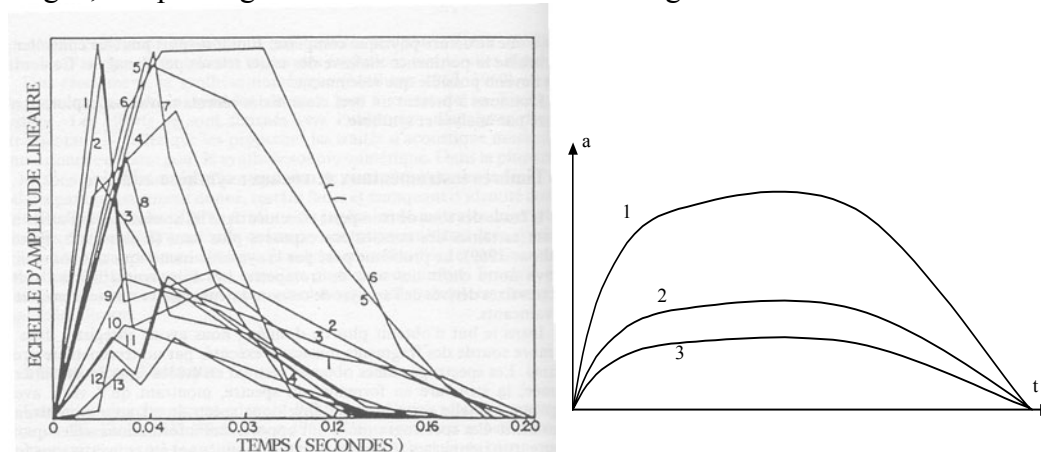
Überlagerung Teiltonhaltiger Klänge gleicher Nullphase. (a) Einklang, (b) Quinte (2 : 3), (c) leicht erhöhte Quinte. Das Summenspektrum bei (a) ist nicht von demjenigen eines Einzelklangs zu unterscheiden. Bei (b) gibt der gemeinsamen Oberton evtl. Anlass zu einer neuen Tonempfindung. Bei (c) bilden sich zwei Schwebungspaare, dasjenige aus den bei (b) koinzidierenden Teiltönen und

dasjenige aus den beiden zusammengedrückten Teiltönen, die in (b) im Grundfrequenzverhältnis 8 : 9 stehen.

Wodurch sind zusammengehörige Teiltöne ausgezeichnet? Helmholtz nennt als Momente die Erfahrung [Helmholtz 1863, 105], verschiedene Einsatzzeiten, Charakteristik des Klangansatzes, Art des Verklingens [107–108], charakteristische Nebengeräusche [109]. Ein vereinheitliches Moment stellen auch parallel verlaufende Teiltonamplituden in der zeitlichen Entwicklung eines Klanges dar:

[...] wenn ein Klang einsetzt, setzen alle seine Theiltöne in gleicher Stärke ein, wenn er schwillt, schwellen sie meistens alle gleichmässig, wenn er aufhört, hören alle zusammen auf. Es ist deshalb die Gelegenheit, diese Töne vereinzelt und selbstständig zu hören meist abgeschnitten. Ganz ähnlich [...] verschmelzen denn auch die Partialtöne in einem Mixturregister der Orgel, welche alle mit derselben Taste angeschlagen werden, und in gleicher Weise wie ihr Grundton sich in der Melodie fortbewegen. [Helmholtz 1863, 108-109]

Der typische Einheit stiftende Klangverlauf nach Helmholtz kann folglich als Produkt einer Zeitfunktion, welche die sich im Verlaufe des Klangs ändernde Lautstärke beschreibt, mit einem streng periodischen Signal (zu einem festen Spektrum) dargestellt werden. Der Einschwingvorgang der Trompete, bei dem die Teiltöne in unterschiedlicher Weise einschwingen, entspricht gar nicht dieser Modellvorstellung:



Beispiel zur zeitlichen Entwicklung eines Trompetentons nach Risset, Wessel [Quelle: Le timbre 1991, 108]. Die nummerierten Polygonzüge stellen die linearisierten Amplitudenverläufe der Teiltöne 1 bis 13 dar. Die rechte Graphik veranschaulicht Helmholtz' Idealvorstellung für eine parallele Entwicklung der Teiltöne eines Klanges aus drei Teiltönen.

Helmholtz stellt die Frage nach der Berechtigung der Fourieranalyse und der Existenz der Teiltöne wie folgt:

Wir müssen vielmehr fragen, bestehen denn diese Theiltöne eines Klanges, welche die mathematische Theorie ausscheidet und welche das Ohr empfindet, auch wirklich in der Luftmasse ausserhalb des Ohres? Ist diese Art, die Schwingungsformen aufzulösen, wie sie das Theorem Fourier vorschreibt und möglich macht, nicht bloss eine mathematische Fiction, welche zur Erleichterung der Rechnung erlaubt sein mag, aber nicht notwendig einen entsprechenden reellen Sinn zu haben braucht? Warum fallen wir darauf, gerade pendelartige Schwingungen als das einfachste Element aller Schallbewegungen zu betrachten? [...]

Der Umstand, dass das Ohr dieselbe Zerlegung ausführt, spricht nun allerdings schon sehr dafür, dass die genannte Zerlegung einen Sinn hat. [Helmholtz 1863, 58]

Die Formulierung „mathematische Fiction“ dürfte sich auf eine Formulierung von Seebeck beziehen [Seebeck 1844a, 345; vgl. Kap. [4.1.3](#)].

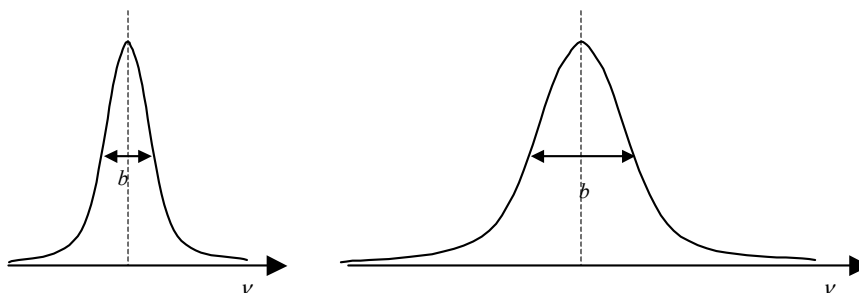
Helmholtz unterscheidet mehrere Realitätsebenen: die mathematische (symbolische), die physikalische, die physiologische und die psychologische. Die periodischen Funktionen können in Sinusschwingungen zerlegt werden (symbolische Ebene). Gewisse periodische Schallsignale können als Vielheit von Tönen erfahren werden (psychologische Ebene). Verändert man bei einem solchen zusammengesetzten Schallsignal die Phasenrelationen der Sinusbestandteile, so ist kein Unterschied erkennbar (psychologisch). Ferner werden bei einem Sinuston aus physiologischen Gründen nie Obertöne gehört. Die Basilarmembran (physiologische Ebene) tut nichts anderes als der Mathematiker, der ein Amplitudenspektrum berechnet (symbolisch). Eine solche Vielheit von Tönen wird je nach Spektrum, Aufmerksamkeitslenkung und Versuchsperson als Einheit oder Vielheit empfunden (psychologische/physiologische Ebene).

Die Frage nach der physikalischen Existenz wird in obigem Zitat über die physiologische Realitätsebene beantwortet. Die Basilarmembran zerlegt den dargebotenen Schall in Tonempfindungen, die mit dem physikalischen Klangspektrum korrespondieren.

Die Textstelle scheint die Frage: Gibt es ein Naturgesetz, das die mathematische Sinusschwingungen als einfachste Schwingung physikalisch auszeichnet? [vgl. Kap. 1.3] positiv zu beantworten. Die von Helmholtz experimentell verifizierte Insensitivität für Phasenrelationen ist unverzichtbarer Bestandteil seiner Beweisführung. Dadurch werden nämlich die periodischen Schallsignale in Klassen mit gleichem Amplitudenspektrum zerlegt, wobei die Elemente der gleichen Klasse ununterscheidbar sind. Die Basilarmembran repräsentiert durch ihren Anregungszustand das Amplitudenspektrum der dargebotenen Klänge.

Resonanz und Dämpfung

Körper, welche, einmal angeschlagen, lange nachtönen, wie Stimmgabeln, sind des Mittönens in hohem Grade fähig [...] Aber eben deshalb muss auch die allergenaueste Uebereinstimmung herrschen zwischen dem eigenen Ton der Gabel und der Tonhöhe des erregenden Tones [...]. Nimmt man dagegen Körper, deren Ton schnell verklingt [...] so werden dieselben ebenfalls die Erscheinung des Mittönens zeigen [...], aber ihr Mittönen wird nicht so beschränkt auf eine gewisse Tonhöhe sein, sie werden von ziemlich verschiedenartigen Tönen leicht bewegt werden. [Helmholtz 1863, 212-213]



Resonanzbreite und Dämpfung in mechanischen Systemen. Je breiter der Resonanzbuckel (gemessen durch die Halbwertsbreite b) desto stärker die Dämpfung, je schmaler der Resonanzbuckel (je schärfer die Resonanz) desto langsamer klingt die angeregte Schwingung ab. Die Basilarmembran hat sowohl eine gute Frequenzauflösung als auch eine gute Dämpfung. Helmholtz vergleicht in seiner Resonanztheorie die Basilarmembran mit einer Harfe, deren benachbarte Saiten lose mit einander verwoben sind [vgl. Helmholtz 1863, 214]

Das Gehör als Resonanzsystem muss gemäss Helmholtz stark gedämpft sein, ansonsten liesse sich das Verfolgen des Tonhöhenverlaufs bei schnellen Trillern schlecht erklären, aber bei tiefen Frequenzen weniger gut [Helmholtz 1863, 213, 214]

Wenn wir also im Folgenden davon sprechen werden, dass einzelne Theile des Ohres für einen bestimmten Ton mittönen, so ist es so zu verstehen, dass sie durch diesen Ton zwar am stärksten in Bewegung gesetzt werden, in schwächerem Grade aber doch auch durch die benachbarten, so dass auch bei der Differenz eines halben Tones ihr Mitschwingen wenigstens noch merklich ist. [Helmholtz 1863, 217]

Das heisst einem physikalischen Nadelspektrum entspricht immer ein kontinuierliches Erregungsmuster auf der Basilarmembran.

Zur Fourieranalyse durch das Gehör:

Jedes einzelne Luftteilchen kann zu jeder Zeit natürlich nur eine Bewegung ausführen. Dass wir eine solche Bewegung in der mathematischen Theorie als eine Summe von pendelartigen Schwingungen betrachteten, war zunächst eine willkürliche Fiction zur Bequemlichkeit der Theorie eingeführt, ohne eine reelle Bedeutung. Eine solche haben wir für diese Zerlegung erst in der Betrachtung des Mitschwingens gefunden, da eine periodische Bewegung, die nicht pendelartig ist, Körper von verschiedener Tonhöhe, entsprechend den harmonischen Obertönen, zum Mittönen bringen kann. Und nun haben wir durch unsere Hypothese auch die Phänomene des Hörens auf solche des Mittönens zurückgeführt, und finden darin den Grund, warum die ursprünglich einfache periodische Bewegung der Luft eine Summe von verschiedenen Empfindungen hervorbringt, und deshalb auch für die Wahrnehmung als zusammengesetzt erscheint.

Die Empfindung verschiedener Tonhöhen wäre hiernach also eine Empfindung in verschiedenen Nervenfasern. Die Empfindung der Klangfarbe würde darauf beruhen, dass ein Klang ausser den seinem Grundtone entsprechenden Corti'schen Fasern noch eine Anzahl anderer in Bewegung setzte, also in mehreren verschiedenen Gruppen von Nervenfasern Empfindungen erregte. [Helmholtz 1863, 220]

Dadurch wird nicht erklärt, durch welche Mechanismen ein Klang als Einheit aufgefasst werden kann. Auch nicht, wie die Periodiktöne – zu denen es keine eigene Anregungszone auf der Basilarmembran gibt – entstehen könnten.

5.5. Existenzstatus und Nachweis der Teiltöne

Helmholtz weist in diesem Zusammenhang darauf hin, dass Stimmgabeln weitgehend sinusförmig schwingen. Stimmgabeln in Kombination mit Resonatoren ergeben die besten Sinustöne, wenn in der Schnittmenge der Eigenresonanzen nur die beiden Haupttöne liegen [vgl. Kap. 5.2]. Dies ist möglich, da die Teiltöne in beiden Teilen, im Taktgeber (Stimmgabel) und im Resonanzkörper (Resonatorkegel) je unterschiedlich inharmonisch verteilt sind.

Mit folgendem zweifelhaftem physikalische Argument begründet Helmholtz die Besonderheit der Sinusschwingung:

Zunächst ist zu bemerken, dass die meisten elastischen Körper, wenn sie durch irgend eine schwache periodisch wirkende Kraft in anhaltende Schwingungen versetzt werden, mit wenigen Ausnahmen, [...] stets in pendelartige Schwingungen gerathen. [Helmholtz 1863, 68-69]

Dass dieses „meistens“ in der Regel falsch ist, sagt Helmholtz an anderer Stelle in Zusammenhang mit Obertonresonanz und wurde von Chladni hinlänglich bewiesen. Dass sogar die durch einen Drehstrom periodisch angeregten Stimmgabeln nicht obertonfrei sind,

sorgt in der Kontroverse Helmholtz, Koenig, Hermann für heisse Köpfe [vgl. Kap. 6.3, 6.4, 6.5], Helmholtz macht sie zusammen mit Hermann zur Rettung der Ortstheorie geltend. Es ist mathematische Konvention, die Lösungen der Bewegungsgleichungen als Superposition von Sinusschwingungen darzustellen. Die Sinusschwingung ergibt sich als mögliche *partikuläre* Lösung der Bewegungsgleichung der Saite, wenn man in der physikalischen Modellierung davon ausgeht, dass die Rückstellkraft proportional zur Auslenkung sei. In analoger Weise ergibt sich die Sinusschwingung bei der Kräftezerlegung am Fadenpendel und aus $x \approx \sin(x)$ für kleine Auslenkungen x (im Bogenmass). Die Superposition von Sinusschwingungen eignet sich auch zur modellierenden Beschreibung der Bewegung schwingender Stäbe mit nicht harmonisch verteilten Eigenfrequenzen. Helmholtz weist auf das nicht ganzzahlige Verhältnis der Eigenfrequenzen bei der kreisförmige Membran hin [Helmholtz 1863, 69].

Die Unterdrückung bestimmter Eigentöne bei Saiten ist ein auditives Kriterium für ihr Fehlen. Allerdings werden neben der sich aus dem grössten gemeinsamen Mass ergebenden Sinuskomponente auch ihre ganzzahligen Frequenzvielfachen unterdrückt, also je nach Perspektive ein ganzer Klang (Helmholtz) oder ein Ton mit nicht sinusförmiger Schwingungsform (Seebeck, Koenig).

Es hat zuerst Thomas Young [London, Philosophical transactions, 1800. T.I, p. 137] nachgewiesen, dass wenn man eine Saite zupft oder schlägt oder, wie wir hinzufügen können, streicht in einem solchen Punkte ihre Länge, welcher Knotenpunkt irgend eines ihrer Flageolettöne ist, dass dann diejenigen einfachen Schwingungsformen der Saite, welche in dem angegriffenen Punkte einen Knoten haben, in der Gesamtbewegung der Saite nicht enthalten sind. [Helmholtz 1863, 89]

Ein Vergleich mit Kap. 2.5.4 zeigt, dass der Zusammenhang schon bei Wallis [1676/7] klar zu Tage tritt. Jedenfalls auch gemäss Helmholtz schon vor dem Satz von Fourier!

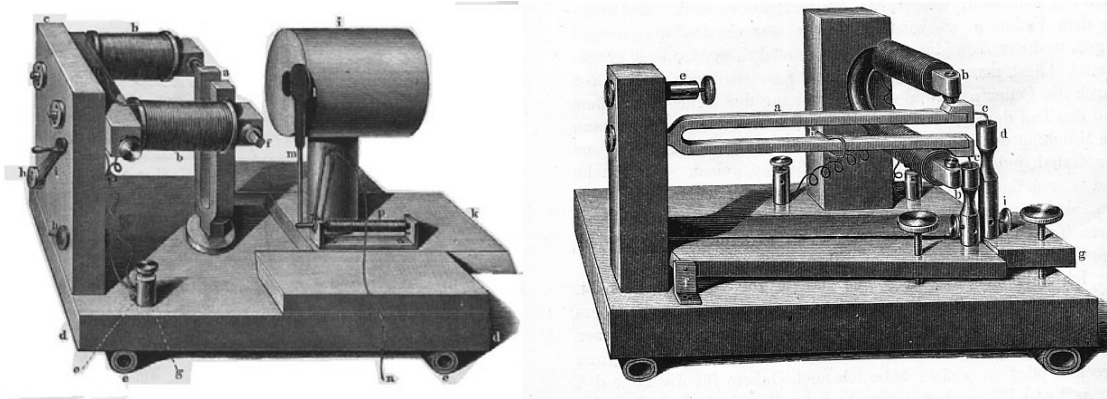
Diese Spiel mit den besonders deutlichen oder unterdrückten Teiltönen ist in Wirklichkeit eines mit Teilklangen. Die Sinustöne spielen dabei ebenfalls nur die Rolle einer möglichen Basis, mit der das ganze Phänomen beschreibbar wird.

Greifen wir also eine Saite gerade in der Mitte ihrer Länge an, so fehlen alle den geradzahligen Partialtönen entsprechenden einfachen Schwingungen [...]. Es gibt dies einen eigenthümlichen hohlen oder näselsnden Klang der Saite. [Helmholtz 1863, 89-90]

Hohl und *näselsnd* ist also durch Spektren, die nur Teiltöne von ungerader Ordnungszahl enthalten, gekennzeichnet. Zu fragen wäre in diesem Zusammenhang, ob auch Spektren mit anders angeordneten periodischen Lücken in den Folgen der Teiltonordnungen wie 1, 2, 4, 5, 7, 8, 10, 11, ... oder 1, 4, 7, 10 ebenfalls als *hohl* und *näselsnd* zu taxieren wären.

5.6. Beweis des Ohmschen Gesetzes

Schon bei Seebeck findet sich die Bemerkung, dass bei Gültigkeit von Ohms Definition des Tons, die Phasenrelationen keine Rolle spielen dürfen. Die Möglichkeit ihren Einfluss zur Stützung seiner Argumentation experimentell zu verifizieren, hat Seebeck nicht in Erwägung gezogen. Helmholtz verwendet zur Klärung dieser Frage einen Apparat, der die Fouriersynthese mittels Stimmgabeln, die durch elektrische Schwingkreise angeregt werden, zum Klingen bringt:



Die linke Abbildung zeigt eine durch Elektromagnete (b) angeregte Stimmgabel (a) mit Resonanzröhre (i), die rechte Abbildung zeigt die eine Stimmgabel verwendende Vorrichtung zur Erzeugung eines sinusförmigen Wechselstromes, eine solche ist dem System der tonerzeugenden Stimmgabeln vorgeschaltet und dient der Synchronisierung der Teiltöne. [Quellen: Helmholtz 1863, 184, 186]

Die Vorrichtung darf als erster Analogsynthesizer angesehen werden. Er diente ursprünglich vor allem zur Vokalsynthese [Helmholtz 1859]. Die Apparatur ist zum Test der Phasenregel, wie Helmholtz selbst feststellt, nur unvollkommen [Helmholtz 1863, 190-195], da durch Veränderung der Phasenlage zugleich auch die Partialamplitude verändert wird. Dies muss für den Vergleichsklang berücksichtigt werden. Die Umänderung der Apparatur nimmt ferner Zeit in Anspruch. Nicht thematisiert wird von Helmholtz der Einfluss der Raumakustik und der Position der Versuchspersonen: eine Veränderung derselben hat, da die Stimmgabeln mehrere Schallquellen *an verschiedenen Orten* darstellen, eine Veränderung der Phasenbeziehung zur Folge, für höhere Frequenzen ausgeprägter als für tiefere. Aufgrund seiner Versuche mit Tönen aus den ersten acht Teiltönen schliesst Helmholtz:

Wir können demnach das wichtige Gesetz aufstellen, dass die Unterschiede der musikalischen Klangfarbe nur abhängen von der Anwesenheit und Stärke der Partialtöne, nicht von ihren Phasenunterschieden. Es ist hier wohl zu bemerken, dass nur von der musikalischen Klangfarbe, wie wir diese oben definiert haben, die Rede ist. Wenn unmusikalische Geräusche mit dem Klange verbunden sind, Knarren, Kratzen, Sausen, Zischen, so können wir diese entweder gar nicht als regelmässige periodische Bewegungen betrachten, oder sie entsprechen sehr hohen, dicht neben einander liegenden und mit einander scharf dissonirenden Obertönen. Auf letztere konnten wir unsere Versuche nicht ausdehnen, und wir werden es deshalb vorläufig zweifelhaft lassen müssen, ob bei dergleichen dissonirenden Tönen Phasenunterschiede in Betracht kommen. Spätere theoretische Betrachtungen werden es wahrscheinlich machen, dass dies wirklich der Fall ist. [Helmholtz 1863, 195-196]

Wenn mehrere Partialtöne innerhalb eines kritischen Bandes liegen, das heisst, wenn es zu Interaktionen zwischen benachbarten Teiltönen kommt, ist nach Helmholtz' Prognose damit zu rechnen, dass die Teiltonphasen eine Rolle spielen. Helmut Fleischer weist auf diese sehr oft ungenau gelesene Stelle hin [Fleischer 1976, 114].

Einschränkend und präzisierend heisst es:

[...] es ist keine Veränderung der Klangfarbe wahrzunehmen, wenigstens keine solche, welche deutlich genug wäre, dass man sie nach der kleinen Zeit von einigen Sekunden, die man zur Umänderung des Apparats gebraucht, noch erkennen könnte, jedenfalls also keine solche Veränderung der Klangfarbe, wodurch ein Vocal in einen anderen verwandelt würde. [Helmholtz 1863, 195]

Bemerkenswerterweise werden die Vokale als Referenzklangfarben genommen. Modifikation der Phasenrelationen kann keinen Vokal in einen anderen überführen.

Das Ohmsche Gesetz kann auch in Fällen, bei denen die analytische Behandlung zu kompliziert oder unmöglich ist, verifiziert werden. Dabei werden die an Resonatoren sichtbar gemachten Teiltöne mit den zugehörigen Tonempfindungen „des unbewaffneten Ohres“ verglichen:

Wo wir die theoretische Analyse der Bewegung nun auch nicht ausführen können, können wir doch immer mittels der Resonatoren und anderer mitschwingender Körper, jeden einzelnen wahrgenommenen Klang zerlegen, und diese Zerlegung, welche durch die Gesetze des Mittönens bestimmt ist, vergleichen mit der des unbewaffneten Ohres. Das letztere ist natürlich viel weniger empfindlich als das mit dem Resonator bewaffnete, und es ist häufig nicht möglich, Töne die der Resonator schwach angibt, zwischen anderen stärkeren ohne ihn zu erkennen. Dagegen findet, soweit meine Erfahrungen reichen, insofern vollständige Uebereinstimmung statt, als das Ohr alle von den Resonatoren stark angegebenen Töne auch ohne sie wahrnimmt, und dagegen keinen Oberton empfindet, den der Resonator gar nicht angibt. [Helmholtz 1863, 96]

Die Methode der Resonatoren erlaubt auch die Zerlegung von nicht periodischen Klängen mit stabilem Amplitudenspektrum.

Eine Möglichkeit, die Fourieranalyse mit dem Gehör zu erlernen, kann es nur dann geben, wenn ein vergleichbarer physiologischer Prozess stattfindet – der nur bewusst gemacht werden muss. Gemäss Helmholtz sind dagegen Farbempfindung immer atomar, obschon eine Aufteilung der Frequenzinformation auf verschiedene Zelltypen stattfindet.

5.7. Der Ohm/Seebeck-Streit aus der Sicht von Helmholtz

Das Gehör bemerkt gemäss Helmholtz keine Töne, die den Resonatoren entgehen, wohl aber entdecken diese manchmal Töne, die aufgrund der Stärke anderer Töne vom Gehör nicht leicht oder gar nicht erkannt werden. Dies kann als Hinweis auf Verdeckungsphänomene gedeutet werden. *Residualtöne* sind Töne, die gehört, aber nicht von Resonatoren entdeckt werden können, und gerade hier sind die von Ohm und Seebeck diskutierten Sirenentöne anzusiedeln. Im Unterschied zu den Residualtönen könnten *Differenztöne*, wenn die Resonatoren Zugang zum Schallsignal im Ohr hätten, von diesen entdeckt werden.

Helmholtz leugnet die von Seebeck behauptete Disproportionalität zwischen physikalischem Spektrum und wahrgenommenen Teiltonverhältnissen:

Seebeck weist in den einzelnen Fällen nach, dass die einfachen Schwingungen, die den Obertönen entsprechen, eine namhafte Stärke haben, während doch die Obertöne in dem zusammengesetzten Klange gar nicht, oder schwer zu hören sind. Diese Thatsache [...] kann für den einen Beobachter vollständig richtig sein, namentlich wenn er nicht die richtigen Mittel für die Beobachtung der Obertöne anwendet, während ein Anderer, oder auch jener Erste selbst bei besserer Unterstützung, die Obertöne vollkommen gut hört. [Helmholtz 1863, 101]

Ein synthetischer Klang aus zwei simultan angeblasenen Flaschen wird gemäss Helmholtz je nach Lenkung der Aufmerksamkeit synthetisch oder analytisch aufgefasst. Verschmelzung kann sogar dann auftreten, wenn der höhere Partialton stärker als der Grundton ist [Helmholtz 1863, 109-111]. Eine solche Verschmelzung kann nicht als Gehörtäuschung abgetan werden:

Wenn Ohm es für eine Gehörtäuschung erklärt, dass das Ohr die Obertöne ganz oder zum Theil als Verstärkung des Grundtones (oder vielmehr des Klanges, dessen Höhe durch die des Grundtones bestimmt wird) auffasst, so hat er hier freilich nicht ganz den richtigen Ausdruck gebraucht, obgleich er richtiges meinte, und Seebeck konnte ihm mit Recht erwidern, dass das Ohr der einzige Richter in Sachen der Gehörsempfindungen sein müsse, und man die Art, wie das Ohr Töne auffasse, nicht als Täuschung bezeichnen dürfe. [...] Wir können also allerdings von den Empfindungen des unbefangenen auf die Aussendinge gerichteten Ohres, dessen Interessen Seebeck vertritt, appellieren an das sich selbst

aufmerksam beobachtende und in seinen Beobachtungen zweckmässig unterstützte Ohr, welches in der That so verfährt, wie das von Ohm aufgestellte Gesetz es vorschreibt. [Helmholtz 1863, 111]

Es wäre also nur eine Frage der Übung, bis mit Hilfe der „audialisierten“ Klanganalyse, die wahre Spektralanalyse erkannt und erlernt ist.

5.8. Die Tücken der Lautstärke

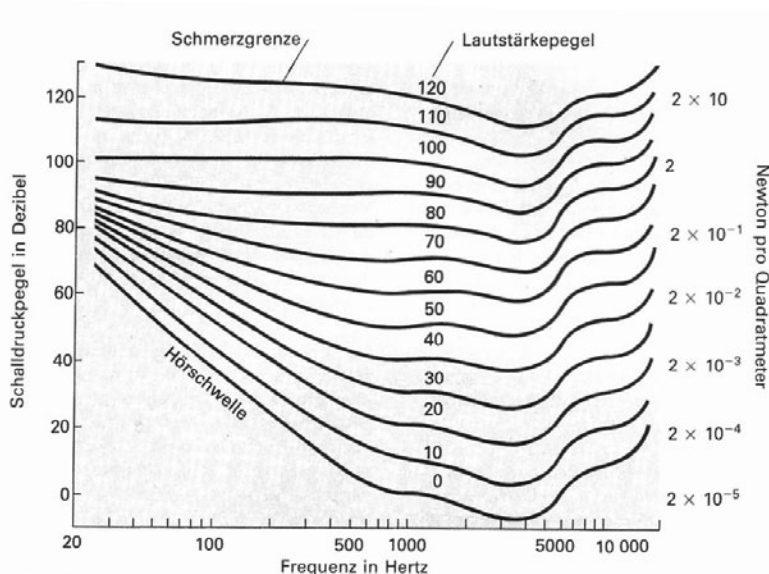
Bezüglich der Stärkenverhältnisse der Partialtöne, das heisst für die Bewertung verschiedener Amplitudenspektren ist folgende Bemerkung zentral:

Mechanisch ist die Stärke der Schwingungen für Töne verschiedener Höhe durch ihre lebendige Kraft, d. h. durch das Quadrat der grössten Geschwindigkeit zu messen, welche die schwingenden Theilchen erreichen. Aber das Ohr hat verschiedene Empfindlichkeiten für Töne verschiedener Höhe, so dass ein für verschiedene Tonhöhen gültiges Maass der Intensität der Empfindung hierdurch nicht gewonnen werden kann. [Helmholtz 1863, 20 Fussn.]

Mit der lebendigen Kraft ist die maximale kinetische Energie ($E_{kin} = m \cdot v_{max}^2$) gemeint (v_{max} ist die maximale Geschwindigkeit des schwingenden Luftpartikels, das heisst die Momentangeschwindigkeit während des Durchgangs durch die Gleichgewichtslage). Die kinetische Energie ist wegen der frequenzabhängigen Empfindlichkeit des Gehörs kein physiologisches Mass für die Lautheitsempfindung: Je nach Frequenz werden Sinustöne gleicher kinetischer Energie als verschieden laut empfunden.

Helmholtz stellt ein Empfindlichkeitsmaximum des Gehörs etwa bei f_{is}^{IV} (≈ 2950 Hz) fest [Helmholtz 1863, 270]. Dies ist eine gute Schätzung, was man an den Minima der Kurven gleicher Lautheit (s. u.) ablesen kann.

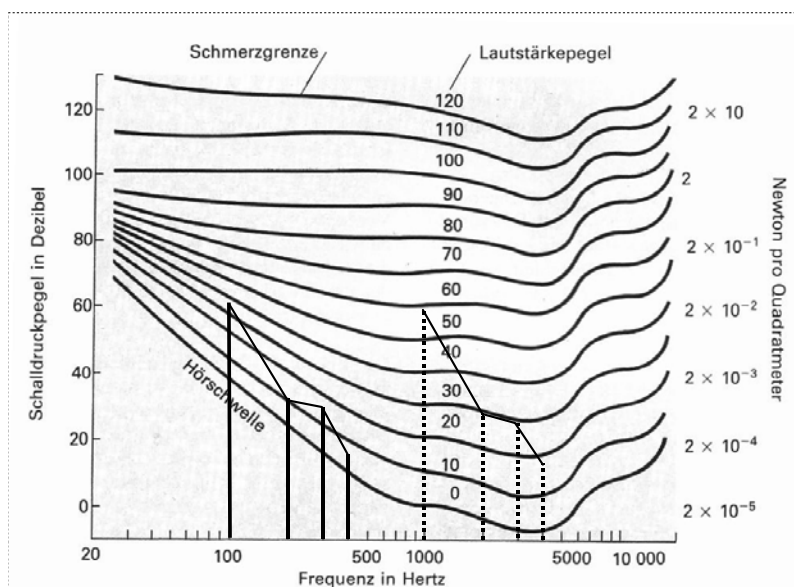
Das Verhältnis zwischen dem (physikalischen) Schalldruck und der entsprechenden Lautheitsempfindung wurde vor Helmholtz meines Wissens noch nie untersucht. Für Sinustöne (als Testtöne) besteht ein nicht linearer Zusammenhang zwischen Schalleistung und empfundener Lautheit, der sich grafisch mit Hilfe von Kurven gleicher Lautheit, den Isophonen, veranschaulichen lässt:



Isophonen nach [Pierce 1989, 101], erstmals publiziert in [Fletcher et al. 1933, 91] und im gleichen Jahr der ASA als Standard vorgeschlagen. Auch die auf beiden Achsen logarithmische Darstellung

bietet (wegen der Wendepunkte) keine globale Linearisierungsmöglichkeit. Zwischen dem logarithmisch basierten psychoakustischen Mass *Phon* (Lautstärke) und dem psychoakustischen *Son* (Lautheit) besteht eine ebenfalls logarithmische Beziehung, mit der die Addition von Lautheiten adäquat beschrieben wird [vgl. Bailhache 2001, 180-182 für eine ausführlichere Darstellung der Zusammenhänge].

Dieser Sachverhalt ist von grosser Tragweite für eine relative Sicht auf die Klangfarben zu verschiedenen Tonhöhen: Die gleiche Gestalt des physikalischen Amplitudenspektrums führt bei verschiedener Grundfrequenz zu veränderten Teiltonverhältnissen in der Wahrnehmung, denn durch die Versetzung des Intensitätsspektrums (in Dezibel) in einen anderen Frequenzbereich ändert die Lautheit der verschiedenen Teiltöne unterschiedlich. Eine Betrachtung, die diesem Sachverhalt Rechnung trägt und die physikalischen auf die „physiologischen Spektren“ bezieht, hat also zu berücksichtigen, dass die geometrische Gestaltähnlichkeit des physikalischen Spektrums nicht mit derjenigen des physiologischen Spektrums korrespondiert. Folglich gehört auch zum gleichen „Lautheitsspektrum“ je nach Grundfrequenz ein anderes Intensitätsspektrum und damit auch eine andere Schwingungsform!



Die fett eingezeichneten Spektrallinien repräsentieren einen Klang mit vier Teiltönen und Grundfrequenz 100 Hz, die gestrichelt eingezeichneten Spektrallinien den physikalisch analogen Klang zur Grundfrequenz 1000 Hz. Wegen der logarithmischen Darstellung der Frequenzachse sind die beiden Spektren kongruent. Während der erste Klang zu einer Lautheitsempfindung von etwa 35 – 10 – 15 – 5 führt, ergibt sich für den zweiten 58 – 30 – 28 – 18. Abgesehen davon, dass der 1000 Hz-Klang trotz gleicher Schalleistung wesentlich lauter erscheint, ist der dritte Teilton im 100 Hz-Klang lauter als der zweite, im 1000 Hz-Klang hingegen ein wenig leiser. Während im 100 Hz-Klang das Lautheitsverhältnis zwischen stärkstem und schwächstem Teilton 7 : 1 beträgt, entspricht dieses im 1000 Hz-Klang dem „wirklichen“ Schallpegelverhältnis von etwas mehr als 3 : 1.

Helmholtz ist sich der Konsequenzen der frequenzabhängigen Empfindlichkeit des Gehörs für die Wahrnehmung von Klängen durchaus bewusst:

Erstens ist es nämlich nöthig, die Stärke der Luftschwingungen für sehr tiefe Töne ausserordentlich viel grösser zu machen als für hohe, wenn sie einen ebenso starken Eindruck auf das Ohr machen sollen. [Helmholtz 1863, 263]

Daraus folgt denn weiter, dass in zusammengesetzten Klängen von grosser Tiefe die Obertöne den Grundton an Stärke überwiegen können, selbst wenn in Klängen derselben Art, aber von grösserer Höhe, die Stärke des Grundtons bei weitem überwiegt. [Helmholtz 1863, 264]

„derselben Art“ bedeutet hier gleiches Amplitudenspektrum und mit Stärke ist die empfundene Lautheit gemeint. Angenommen die musikalische Klangfarbe im Sinne von Helmholtz sei durch die Gestalt des Lautheitsspektrums determiniert, so dass Klänge verschiedener Tonhöhe bezüglich Klangfarbe vergleichbar sind, dann unterscheiden sich Klänge gleicher subjektiver Klangfarbe nicht nur durch die Phasenrelationen, sondern auch im Amplituden- und im (physikalischen) Intensitätsspektrum.

5.9. Spektrale Charakterisierung von Klangfarbenattributen

Zusammenfassend nennt Helmholtz folgende Abhängigkeiten der Klangfarbe von der Partialtonzusammensetzung:

1. Einfache Töne [...] klingen sehr weich und angenehm, ohne alle Rauigkeit, aber unkräftig und in der Tiefe dumpf.
2. Klänge, welche von einer Reihe ihrer niederen Obertöne bis etwa zum sechsten hinauf in mässiger Stärke begleitet sind, sind klangvoller musikalischer. Sie haben mit den einfachen Tönen verglichen, etwas Reicherer und Prächtigeres, sind aber vollkommen wohl lautend und weich, so lange die höheren Obertöne fehlen. [...]
3. Wenn nur die ungeraden Obertöne da sind [...], so bekommt der Klang einen *hohlen* oder bei einer grösseren Zahl von Obertönen einen *näselnden* Charakter. Wenn der Grundton an Stärke überwiegt, ist der Klang *voll*, *leer* dagegen, wenn jener an Stärke den Obertönen nicht hinreichend überlegen ist. [...]
4. Wenn die höheren Obertöne jenseits des sechsten oder siebenten sehr deutlich sind, wird der Klang *scharf* und *rauh*. [...] bei geringerer Stärke beeinträchtigen die hohen Obertöne die musikalische Brauchbarkeit nicht wesentlich, sind im Gegentheil günstig für Charakteristik und Ausdrucksfähigkeit der Musik. [Helmholtz 1863, 180-181]

Nicht konform mit seiner Definition des Klangs als streng periodische Schalldruckverläufe unterscheidet Helmholtz drei Gruppen von Klängen:

- Klänge ohne Obertöne
- Klänge mit unharmonischen Obertönen
- Klänge mit ausschliesslich harmonischen Obertönen

Letzere werden in eigenen Unterkapiteln *Klänge der Saiten*, *Klänge der Streichinstrumente*, *Klänge der Flötenpfeifen*, *Klänge der Zungenpfeifen*, *Klänge der Vocale* behandelt. Die zweite Kategorie besteht aus nicht-periodischen Klängen und wird von der Fourieranalysis periodischer Funktionen nicht abgedeckt.

Klänge ohne Obertöne: Die Klangfarbe der Sinustöne

Es sind diese Töne ungemein weich, frei von allem Scharfen und Rauhen. [...] die Klangfarbe solcher tiefen einfachen Töne ist auch ziemlich dumpf. Die einfachen Töne der Sopranlage klingen hell, aber auch die den höchsten Soprantönen entsprechenden sind sehr weich [...] [Helmholtz 1863, 119]

Gleiches Obertonspektrum in verschiedener Tonhöhe bedeutet also nicht Übereinstimmung in allen klangfarblichen Eigenschaften, denn nur die tiefen Sinustöne sind *dumpf*. *Weich* hingegen sind sie im ganzen musikalisch brauchbaren Frequenzbereich. Der Einzelton als Klang aufgefasst *hat* selbst eine Klangfarbe. Das Spektrum zeigt aber nur eine Spektrallinie, und zur Charakterisierung eines Sinustons bleiben nur die Frequenz und die Amplitude, welche zusammen die Lautheit bestimmen. Die Klangfarbe eines Sinustons ist damit eine Funktion der Frequenz wie die Farbe von monochromatischem Licht, wenn sie als unabhängig von der Amplitude angesehen wird. Diese Beurteilung der Sinustöne zeigt, dass eine Gleichsetzung der Klangfarbe mit der Gestalt des Spektrums nicht in Helmholtz' Sinn sein kann. Denn wenn schon die einfachen Töne durch Transposition ihre Klangfarbe ändern,

ist nicht zu erwarten, dass dies für zusammengesetzte Töne anders sein soll. Helmholtz selbst hat die ihm angelastete rein relative Sicht auf die Klangfarbe wohl dadurch mitverschuldet, dass er die Wirkungskomponente der Klangfarbe, die sich in den klangcharakterisierenden Adjektiven manifestiert nicht immer genügend von seiner formalen Bestimmung der *musikalischen* Klangfarbe als Amplitudenspektrum eines periodischen Klangs abgrenzt.

Klänge mit unharmonischen Obertönen

Klänge mit unharmonischen Obertönen fallen streng genommen nicht unter den Begriff des Klangs im Sinne von Helmholtz, da ihr Schalldruckverlauf in der Regel – sobald irrationale Frequenzverhältnisse beteiligt sind – nicht periodisch ist. Ist dagegen ein einziger Teilton so verstimmt, dass er mit dem Grundton ein rationales aber nicht multiples Frequenzverhältnis bildet, entsteht zwar ein periodisches Signal, seine Periodizität weicht aber von derjenigen des Grundtons erheblich ab. Je nach Frequenzverhältnis entspricht die Periodizität dann einer anderen „Untertonfrequenz“ (ganzzahliger Teiler) des „eigentlichen“ Grundtons.

Dennoch kann die Bewegung schwingender Stäbe, Glocken etc. im eingeschwungenen Zustand als Summe von Sinusschwingungen dargestellt werden, und diese Teiltöne verändern ihre Amplitude im Verlaufe des Klingens nur langsam. Sie können also durch ein Nadelspektrum adäquat beschrieben werden.

Es gibt allerdings im 19. Jahrhundert kein mathematisches Verfahren, das die Teiltöne, das heisst das Nadelspektrum, allein aufgrund der Signalgestalt eines solchen quasi-periodischen Klangs direkt ermitteln könnte. Auf mechanischem Wege kann die Sinustonzerlegung mittels geeigneter Resonatoren näherungsweise bestimmt werden. Auch das Gehör reagiert auf eine gerinfüßige Frequenzabweichung nach Helmholtz' Vorstellung mit einer kleinen örtlichen Verschiebung der betreffenden Resonanzstelle auf der Basilarmembran. Es stellt sich ihm also keine prinzipielle Schwierigkeit bei der Verarbeitung von Klängen mit unharmonischen Obertönen.

Das Gemeinsame der bisher beschriebenen Instrumente ist, dass sie angeschlagen unharmonische Obertöne geben, sind diese naheliegend zum Grundton, so ist der Klang in hohem Grade unmusikalisch, schlecht und kesselähnlich. Sind die Nebentöne weit entfernt vom Grundtone und schwach, so wird der Ton zwar musikalischer, wie bei den Stimmgabeln, der Stabharmonica, den Glocken, und brauchbar für Märsche und andere rauschende Musik, die den Rhythmus besonders hervorzuheben hat, aber in der eigentlich künstlerischen Musik hat man, wie oben bemerkt wurde, dergleichen Instrumente noch immer verschmäht, und wohl mit Recht. Denn die unharmonischen Nebentöne, wenn sie auch schnell verklingen, stören doch die Harmonie in sehr unangenehmer Weise, wenn sie sich bei jedem Anschlag neu wiederholen. [Helmholtz 1863, 126] [vgl. Kap. [8.2](#)]

Helmholtz' Theorie der Schallverarbeitung auf der Basilarmembran bietet nach dem Gesagten keine Möglichkeit periodische Klänge von nicht-periodischen stationären Klängen physiologisch oder psychoakustisch zu unterscheiden, falls die Teiltöne nicht mit einander schweben! Erst im Kontext mit andern Klängen, die einen harmonischen Teiltonaufbau haben, machen sie sich – negativ – bemerkbar.

Was macht die schnell verklingenden, entfernten unharmonischen Nebentöne denn unharmonisch? Die Wortverbindung „unharmonische Nebentöne“, die eigentlich nur Teiltöne bezeichnet, deren Frequenzen keine ganzzahligen Vielfache der Grundfrequenz sind, apostrophiert sie zugleich auch als Töne, die die Harmonieempfindung stören. Da Helmholtz' Theorie eine positive Auszeichnung der harmonischen Klänge auf physiologischer Grundlage nicht leistet, ist die Behauptung im letzten Satz des obigen Zitats zu hinterfragen.

Falls harmonisch liegende, entfernte Obertöne untereinander nicht schweben, dürfte eine geringfügige Frequenzveränderung ebenfalls keine Schwebungen hervorrufen. Falls hingegen bereits die harmonisch liegenden Teiltöne untereinander Schwebungen verursachen, werden

dieselben bei Frequenzveränderungen ihre Schwebungsfrequenzen und die zugehörige Rauigkeitsempfindung stetig ändern, und allfällige neue Schwebungspaare treten nicht sprunghaft auf.

Unter Vernachlässigung von nicht-linearen Effekten (Differenztönen) sind also harmonische und nicht-harmonische Einzelklänge – unter der Ohmschen Annahme der unabhängigen Verarbeitung im Ohr ohne Zusatzvoraussetzungen – prinzipiell nicht auseinanderzuhalten. Die Auszeichnung der Folge der positiven ganzen Zahlen als natürliche Harmoniestifter ist im Rahmen einer kontextfreien Ortstheorie physiologisch nicht nachvollziehbar. Der kritisierte Satz weist andererseits auf die Diskrepanz zwischen klingender Wirklichkeit und idealtypischer Modellierung der musikalischen Klangfarbe deutlich hin. Töne von Stimmgabeln, Stabharmonika und Glocken weisen eine Spektraldynamik und Teiltonverhältnisse auf, die durch das Theorem von Fourier in seiner ursprünglichen Form, wie es im 19. Jahrhundert auf die Musik angewandt wird, nicht eingefangen werden können. Andererseits kann Helmholtz mit seinen Resonatoren nicht-harmonische Teiltonverhältnisse – wie auch schon Chladni mit seinen Klangfiguren – experimentell nachweisen, und aus Sicht seiner Resonanztheorie des Hörens besteht kein Grund, stationären Schall mit konstantem diskreten Amplitudenspektrum nicht als Klang zu bezeichnen. Die Resonanzschärfe der einzelnen Cortischen Fasern ist ja in Helmholtz' Modellierung umgekehrt proportional zu ihrer Dämpfung, also ohnehin nicht beliebig gut.

In Zusammenhang mit Klängen mit inharmonischen Spektren gibt Helmholtz ferner die folgende spektrale Charakterisierung *metallischer* Klangfarben:

Das allgemeine Kennzeichen dessen, was man metallische Klangfarbe zu nennen pflegt, glaube ich deshalb dadurch bezeichnen zu können, dass verhältnismässig hohe Obertöne anhaltend und in gleichmässigem Flusse mitklingen. [Helmholtz 1863, 122]

Die Teiltöne hoher Ordnungszahl dürfen also nicht zu schnell abklingen, das heisst sie müssen im stationären Abschnitt eines Klanges wesentlich vorhanden sein, und sie sind in der Regel nicht ganzzahlige Vielfache einer Grundfrequenz.

Klänge der Saiten

Die Stärke der Obertöne im Klang einer angeschlagenen Saite hängt im Allgemeinen ab:

- 1) von der Art des Anschlags
- 2) von der Stelle des Anschlags
- 3) von der Dicke, Steifigkeit und Elasticität der Saite. [Helmholtz 1863, 128]

Während man einerseits den Klang klimpernder, schärfer und spitzer machen kann, indem man die Saite mit härteren Körpern schlägt, so kann man andererseits den Ton auch dumpfer machen, d.h. den Grundton über die Obertöne überwiegen machen, wenn man mit einem weichen und schweren Hammer schlägt, z. B. mit einem kleinen eisernen Hammer, dessen Schlagfläche mit einer Kautschukplatte überzogen ist. Namentlich die Saiten der tieferen Octaven geben dann einen viel volleren, aber dumpfen Klang. [Helmholtz 1863, 133]

[...] so beweist dies klar, dass das musikalisch gebildete Ohr einen mit Obertönen in gewisser Stärke ausgestatteten Klang bei einem Instrumente, welches für reiche Harmonieverbindungen bestimmt ist, vorzieht. In dieser Beziehung ist die Zusammensetzung des Klanges der Claviersaiten von grossem Interesse für die ganze Theorie der Musik. Bei keinem anderen Instrumente ist eine so breite Veränderlichkeit der Klangfarbe vorhanden, wie hier; bei keinem anderen kann deshalb das musikalische Ohr sich so frei die seinen Bedürfnissen entsprechende auswählen. [Helmholtz 1863, 134]

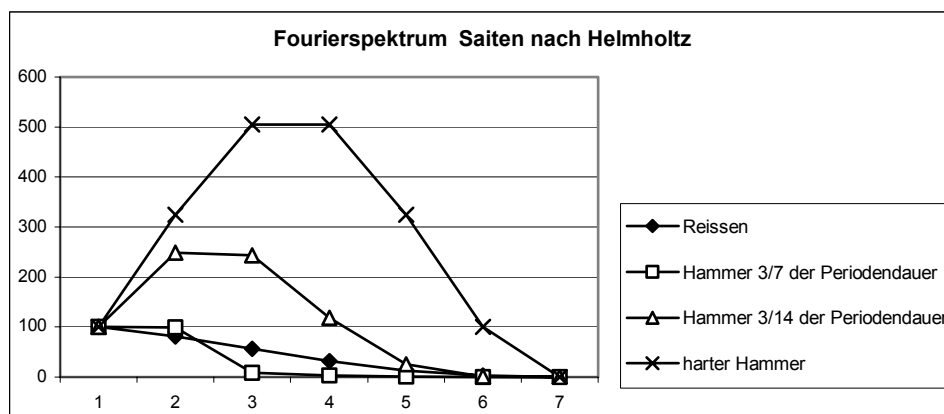
Die „breite Veränderlichkeit der Klangfarbe“ bezieht sich auf bauliche Massnahmen, und nicht auf ein vorgegebenes Instrument. Es ist heute akzeptiert, dass die spektrale Zusammensetzung des ausgehaltenen, nicht pedalisierten Klaviertons ausschliesslich durch die Geschwindigkeit, mit der der Hammer die Saite trifft, determiniert ist. Sie hängt also von nur einem physikalischen Parameter ab.

Anschlag in $\frac{1}{7}$ der Saitenlänge.

Ordnungszahl des Partialtons	Anschlag durch Reissen	Anschlag durch den Hammer, dessen Berührung dauert				Anschlag mit einem ganz harten Hammer
		$\frac{3}{7}$ c''	$\frac{3}{10}$ g'	$\frac{3}{14}$ $C_I - c'$	$\frac{3}{20}$	
1	100	100	100	100	100	100
2	81,2	99,7	189,4	249	285,7	324,7
3	56,1	8,9	10,9	242,9	357,0	504,9
4	31,6	2,3	17,3	118,9	259,8	504,9
5	13,0	1,2	0,0	26,1	108,4	324,7
6	2,8	0,01	0,5	1,3	18,8	10,0
7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Theoretische Intensitäten der Partialtöne [Helmholtz 1863, 135]

Nur bei der gezupften Saite dominiert der Grundton klar. Bei geschlagener Saite ergeben sich nach Helmholtz' Berechnungen je nach Anschlagstelle und Härte des Hammers völlig unterschiedliche Spektren, mit teilweise dominierendem 2. oder 3. Teilton. Aus den Zahlen ergeben sich folgende Spektren:



Bei gleicher Kontaktstelle tritt der Grundton gegenüber den anderen Teiltönen je nach Dauer des Schlages auf die Saite weniger oder mehr in den Vordergrund. Die Spektren der mit einem Hammer angeschlagenen Saiten entsprechen nicht dem Ideal der mit zunehmender Ordnung rasch abnehmenden Teiltöne wie bei der gezupften Saite. In allen Fällen verschwindet der siebte Teilton wegen der Anschlagstelle bei $\frac{1}{7}$ der Saitenlänge, höhere Teiltöne sind möglich, aber von Helmholtz nicht berechnet worden.

Helmholtz gibt folgende spektrale Charakterisierung für eine *leere* Klangfarbe:

Die Eigenthümlichkeit des Klanges nämlich, welche wir mit dem Namen der *Leerheit* belegen, entsteht, wenn die Obertöne verhältnismässig zu stark gegen den Grundton sind. [Helmholtz 1863, 130]

Der Anschlag mit einem harten Hammer im obigen Beispiel müsste also einen leereren Klang verursachen als beim Zupfen. Die Berechnungen von Helmholtz beziehen sich auf die Bewegung der Saiten. Der Einfluss des Resonanzkörpers wird dabei vernachlässigt.

Klänge der Streichinstrumente

Bereits um 1800 beobachtete Young die Leuchtspur eines schwingenden Punktes um damit Rückschlüsse auf das zeitliche Verhalten schwingender System zu gewinnen. Bei der Überlagerung von Schwingungen in verschiedene Raumrichtungen mit kommensurablen Grundfrequenzen legt ein Punkt während jeder vollen Periode der kombinierten Schwingung eine geschlossene Kurve zurück. Wegen der Trägheit des Auges produziert demnach ein leuchtender Punkt bei Frequenzen im Hörbereich den Eindruck einer stehenden geschlossenen Kurve. Die dabei entstehenden Kurven werden Lissajous-Figuren genannt. Mit dem von Helmholtz erfundenen Vibrationsmikroskop gelingt ihm die Beobachtung der Form einer eindimensionalen Schwingung dadurch, dass er die schwingenden Punkte durch ein orthogonal schwingendes Linsensystem betrachtet [Helmholtz 1863, 137–140]. Das Vibrationsmikroskop ist ein mechanischer Vorläufer des Kathodenstrahloszilloskops. Wenn eine Saite direkt auf einer Knotenstelle gestrichen wird, fehlt im Frequenzspektrum die zugehörige Teiltonkomponente (und ebenso fehlen alle ihre Frequenzvielfachen). Im Zeitsignal werden die fehlenden Teiltöne „sichtbar“, denn im Vibrationsmikroskop sind an Stelle der geradlinigen Schenkel „Kräuselungen“ in der Sägezahnschwingung mit der Frequenz der fehlenden Teiltöne zu sehen. [Helmholtz 1863, 143–144]. Die Beobachtung der Zeitsignale der gestrichenen Saite zeigt den grossen Einfluss geringfügiger klanglicher Veränderung auf die „Schwingungsfigur“ und äussert sich auf andere Weise als kratzende Störungen:

Es ist übrigens ein sehr interessantes Schauspiel, die Schwingungsfigur zu beobachten, während man kleine Veränderungen der Bogenführung vor sich gehen lässt, und dabei wahrzunehmen, wie leise Veränderungen in der Klangfarbe sich immer gleich durch sehr merkliche Veränderungen in der Schwingungsfigur zu erkennen geben.

[...] Jedes Kratzen des Bogens giebt sich dagegen durch plötzliche und sprungweise Verschiebungen und Veränderungen der Schwingungsform zu erkennen. Ist das Kratzen anhaltend, so hat das Auge gar nicht Zeit, eine regelmässige Figur aufzufassen. Die kratzenden Geräusche des Violinbogens sind also als unregelmässige Unterbrechungen der normalen Saitenschwingungen zu betrachten, worauf die letzteren von Neuem und mit neuem Anfangspunkt einsetzen. [Helmholtz 1863, 145]

Die Schärfe des Klangs der Streichinstrumente ist gemäss Helmholtz durch die deutlichen Teiltöne der Ordnungen 6 bis 10 verursacht:

Der Grundton ist im Klange der Streichinstrumente verhältnissmässig kräftiger als in den nahe ihren Enden geschlagenen oder gerissenen Saiten des Claviers und der Guitarre; die ersten Obertöne sind verhältnissmässig schwächer, dagegen sind die höheren Obertöne von sechsten bis etwa zehnten hin viel deutlicher, und verursachen die Schärfe des Klangs der Streichinstrumente. [Helmholtz 1863, 143]

Helmholtz bringt auch die Eigenfrequenzen des Resonanzraums und ihren Einfluss auf die Klangfarbe zur Sprache [147-148], scheint aber ihren Einfluss zu unterschätzen.

In Ziffern lässt sich dieser Einfluss leider noch nicht ausdrücken. Sehr stark ist das Maximum der Resonanz für die eigenen Töne der Luftmasse nicht gerade ausgesprochen; es würde auch sonst eine viel grössere Ungleichartigkeit in der Tonleiter der genannten Streichinstrumente hervorrufen, sobald man den Theil der Scala passirte, in welchem die eigenen Töne ihrer Luftmasse liegen. Demgemäss ist zu vermuthen, das auch der Einfluss auf die relative Stärke der einzelnen Partialtöne der Klänge dieser Instrumente nicht sehr hervortretend ist. [Helmholtz 1863, 148]

Die Stelle verweist auf eine *relative* Deutung der klangfarblichen Identität der Streichertöne. Beim Ändern der Tonhöhe ändert – bei gleichen durch den Resonanzkörper bedingten Formanten – die Gestalt des Spektrums. Da eine solche Gestaltänderung gemäss Helmholtz' Annahme eine wahrnehmbare Klangfarbenänderung zur Folge haben müsste, folgert er, dass der Resonanzraum im Vergleich zur Primärschwingung der Saite nur eine untergeordnete Rolle auf die Klangfarbe, das heisst auf das abgestrahlte Schallspektrum, hat. Man vergleiche demgegenüber Helmholtz' *absolute* Sicht auf die Identität der Vokale.

Klänge der Vokale

Die Vokalklänge unterscheiden sich von den Klängen der meisten anderen musikalischen Instrumente also wesentlich dadurch, dass die Stärke ihrer Obertöne nicht von der Ordnungszahl derselben, sondern von deren absoluten Tonhöhe abhängt. Wenn ich z.B. den Vocal A auf die Note Es singe, ist der verstärkte Ton b" der zwölfte des Klanges, und wenn ich denselben Vocal auf die Note b' singe, ist es der zweite Ton des Klanges, welcher verstärkt wird. [Helmholtz 1863, 180]

Vokale sind also nicht durch die relativen, auf einen beliebigen Grundton bezogenen Spektren bestimmt, sondern durch Formantbereiche, die durch absolute Frequenzen bestimmt sind. Je nach Grundfrequenz müssen Teiltöne mit anderer Ordnungszahl deutlich hervortreten, damit zwei Töne vom gleichen Vokaltyp sind. Ihre Spektren sind also nicht isomorph. Deshalb können die betreffenden Schallsignale nicht durch Streckung in Zeitrichtung in einander übergeführt werden. Veränderte Wiedergabegeschwindigkeit bei einem (idealen) Phonographen beeinflusst also nicht nur die Tonhöhe sondern auch den Vokalcharakter von gesungenen Vokalen.

Helmholtz geht davon aus, dass die meisten Musikinstrumente keine Formanten ausbilden. In dieser Beurteilung unterschätzt er den ihm durchaus bekannten Einfluss des Resonanzkörpers auf das letztlich abgestrahlte Frequenzspektrum [vgl. Schumann 1925].

In der folgenden Textstelle bezieht Helmholtz die Formantauffassung der Vokale auf seine psychoakustische Konsonanztheorie, wonach die durch Schwebungen verursachte Rauigkeit Ursache der Dissonanzempfindung ist [vgl. Kap. [5.10](#)]:

Zwar werden bei den helleren Vocalen einzelne hoch gelegene Obertöne hervorgehoben, diese sind aber doch zu vereinzelt, um einen wesentlichen und durchgehenden Einfluss auf den Klang der Accorde auszuüben. Aber allerdings können bei einzelnen Consonanzen die charakteristischen Töne der Vocale eine besondere Rolle spielen. Wenn zwei menschliche Stimmen zum Beipsiel die Terz bd' zusammen singen auf den Vocal A, werden der vierte Theilton des b, nämlich b", und der dritte des d', nämlich a", gerade in die charakteristisch starken Obertöne des A hineinfallen, und es wird die Unvollkommenheit der Terzenconsonanz in der Dissonanz a"b" grell zu Tage treten müssen, während diese Dissonanz bei der Wahl des Vocals O ausbleiben muss. [...] Aus diesen Betrachtungen folgt unter Anderem, dass die Uebersetzung des Textes von Gesangcompositionen aus einer Sprache in eine andere auch für den rein musikalischen Effect gar nicht gleichgültig sein kann. [Helmholtz 1863, 312]

Je nach Vokal ist ein auf den gleichen Tönen gesungener Zusammenklang mehr oder weniger dissonant. Die Übersetzung von Gesangskompositionen in eine andere Sprache ist aus Sicht der Helmholtzschen Konsonanzauffassung ohne Veränderung des Klangeindrucks nicht möglich.

Fluktuierender Gebrauch des Begriffs Klangfarbe

Ich gebe im folgenden, ohne auf die Besprechung der Instrumentaltöne durch Helmholtz näher einzutreten, einige Beispiele die den changierenden Klangfarbenbegriff von Helmholtz illustrieren:

In Zusammenhang mit dem Anblasgeräusch bei Flöten heisst es:

Ein solches Geräusch kann man [...] als die Mischung vieler nahe an einander liegender unharmonischer Töne betrachten. Wenn nun der Hohlraum der Pfeife hinzukommt, so verstärkt dieser durch Resonanz diejenigen Töne des Geräusches, welche seinen eigenen Tönen entsprechen, so dass diese an Stärke über alle anderen hinauswachsen, und durch ihre Stärke die anderen verdecken. [Helmholtz 1863, 150]

Das Luftgeräusch beim Anblasen einer Flötenpfeife ist also unvermeidbar. Es liefert gleichsam den Frequenzvorrat, aus dem der Resonanzkörper schöpfen kann. Geräusche werden als Überlagerung eng benachbarter Frequenzen bzw. als Schall mit kontinuierlichem Frequenzspektrum gedeutet. Flötentöne entstehen subtraktiv, durch Ausfilterung.

Zur Bewertung der Konsonanzen am Klavier:

Der vierte, fünfte und sechste Partialton dagegen, welche zur Begrenzung der Terzen dienen, nehmen an Stärke schnell ab, so dass die Terzen verhältnissmässig viel weniger scharf begrenzt sind, als die Octaven, Quinten und Quarten. Das letztere Moment ist wichtig, weil es auf dem Clavier die ungenauen Terzen der temperirten Stimmung viel erträglicher macht, als auf anderen Instrumenten mit schärferen Klangfarben [...]. [Helmholtz 1863, 315]

Trotz der verhältnissmässig reichen Obertöne ist der Eindruck der Dissonanzen des Claviers lange nicht so eindringlich, wie bei den Instrumenten mit lang ausgehaltenen Tönen, weil der Clavierton nur im Moment des ersten Anschlags grosse Stärke hat, und dann sehr schnell an Stärke abnimmt, so dass die die Dissonanzen charakterisierenden Schwebungen nicht Zeit haben, während des ersten starken Einsatzes des Tones zur Erscheinung zu kommen, sie bilden sich erst, während der Ton an Stärke schon wieder abnimmt. [Helmholtz 1863, 315]

Die Stelle hebt die Bedeutung des Einschwingvorgangs hervor. Störende Schwebungen entstehen erst im eingeschwungenen Zustand des Gehörs.

Eine weitere Eigenthümlichkeit in der Auswahl der Klangfarben, dass nämlich die hohen Töne des Claviers viel weniger und schwächere Obertöne haben als die tieferen, haben wir ebenfalls schon erwähnt. [...] Wenn das Intervall zwischen der Note des Basses und des Discants zwischen zwei und drei Octaven beträgt, so liegen die zweite Octave, die höhere Terz und Quinte des Basstones ganz in der Nähe der Note des Discants, und geben mit ihr direkt Consonanz oder Dissonanz, ohne dass noch die Obertöne der Discantnote in das Spiel zu kommen brauchen. Die höchsten Noten des Claviers würden durch Obertöne also nur eine scharfe Klangfarbe bekommen, ohne dass für ihre musikalische Charakterisierung dadurch etwas gewonnen wäre [...]. [Helmholtz 1863, 316]

Die spektrale Zusammensetzung der Klaviertöne ist abhängig von der Grundfrequenz. Bedeutet also das Spielen einer Tonleiter über den ganzen Tonumfang eine stetige Veränderung der Klangfarbe oder dient die verschiedene Teiltonzusammensetzung gar der Erhaltung der Klangfarbe? Eine Transposition des Spektrums eines tiefen Klaviertons auf die höchsten Klaviernoten hätte nach Helmholtz eine Verschärfung der Klangfarbe zur Folge. Gleiches Spektrum zu verschiedener Grundfrequenz garantiert also nicht Gleichheit der Klangfarbe.

An vielen Instrumenten, bei deren Construction man mit der Klangfarbe nicht so frei schalten kann wie bei der des Pianoforte's hat man eine ähnliche Abänderung der Klangfarbe nach der Höhe hin durch andere Mittel zu erreichen gewusst. Bei den Streichinstrumente dient dazu die Resonanz des Kastens, dessen eigene Töne innerhalb der tiefsten Octave des Scala des Instruments liegen. Da die Partialtöne der tönenden Saite in dem Maasse stärker an die Luft abgegeben werden, als sie den Partialtönen des Kastens näher sind, so werden bei den hohen Noten dieser Instrumente die Grundtöne durch die Resonanz viel mehr über ihre Obertöne herausgehoben als bei den tieferen. Bei den tiefsten Noten der Violine dagegen wird nicht bloss der Grundton, sondern auch seine Octave und Duodezime durch die Resonanz begünstigt, da der tiefere Eigenton des Kastens zwischen dem Grundtone und dem ersten Obertone, der höhere Eigenton zwischen dem ersten und zweiten Obertone liegt. [Helmholtz 1863, 317]

Was Helmholtz hier beschreibt ist eine Formanttheorie für Streichinstrumente! In seine Konsonanzgradberechnungen, die auf der Violine basieren, sind keine diesbezügliche Erkenntnisse eingeflossen [vgl. Kap. 5.10].

Die Klangfarbe in den letzten beiden Zitaten ist wieder durch die Gestalt des Spektrums definiert, d. h. verschiedene Töne des Claviers haben eine verschiedene Klangfarbe.

In Bezug auf Schwebungen zwischen Partialtönen höherer Ordnung desselben Klangs schreibt Helmholtz:

Es kann hiernach nicht zweifelhaft bleiben, dass Luftbewegungen, welche tiefen und mit vielen Obertönen versehenen Klängen entsprechen, gleichzeitig eine kontinuierliche Empfindung tiefer Töne und discontinuierliche Empfindungen hoher Töne erregen, und durch diese letzteren rau oder knarrend gemacht werden. Darin liegt die Erklärung der Thatsache [...], dass Klänge mit vielen hohen Obertönen scharf, schnarrend oder schmetternd klingen; darin auch der Grund, warum sie viel durchdringender sind, und warum das Ohr sie nicht so leicht überhören kann. Den ein intermittirender Eindruck erregt unsere Nervenapparate viel stärker, als ein kontinuierlicher [...]. [Helmholtz 1863, 270]

Da mit Zunahme der Anzahl Schwebungen, diese weniger gut wahrgenommen werden können:

Wenn also auch die Form der Luftbewegung, d.h. die Klangfarbe dieselbe bleibt, während die Höhe gesteigert wird, so wird im allgemeinen die Klangfarbe weniger rau werden. [Helmholtz 1863, 270]

Hier wird der Begriff Klangfarbe in zwei verschiedenen Bedeutungen verwendet: Klangfarbe als Gestalt des Spektrum, Klangfarbe in der Empfindung. Für die Wahrnehmung verfielt Helmholtz offensichtlich *keine* relative Theorie!

Abschliessend ein Beispiel, wie Helmholtz mit naturwissenschaftlichen Argumenten an Besetzungsfragen herangeht:

Andererseits, wenn man eine Clarinette mit einer Violine oder Oboe zusammen gebraucht, werden die meisten Consonanzen merklich verschieden klingen müssen, je nachdem die Clarinette die obere oder untere Note des Zusammenklangs übernimmt. So wird zum Beispiel eine grosse Terz d' fis' besser klingen müssen, wenn die Clarinette das d' und die Oboe das fis' übernimmt, so dass der fünfte Ton der Clarinette mit dem vierten der Oboe zusammenfällt. Die für die grosse Terz störenden Paare von Obertönen 3:4 und 5:6 können hier nicht zu Stande kommen, weil der vierte und sechste Ton auf der Clarinette fehlen. [...] Aus ähnlichen Gründen folgt, dass die Quarte und kleine Terz dagegen besser klingen müssen, wenn die Clarinette die obere Note übernimmt. [Helmholtz 1863, 318-319]

Die Bewertung des Instrumententauschs könnte durchaus von Berlioz inspiriert sein [vgl. Kap. 4.4.6].

5.10. Dissonanz und Klangfarbe

Dissonanz wird bei Helmholtz über die Summe aller Schwebungsintensitäten bestimmt und drückt die Rauigkeit eines Zusammenklangs aus. Sie wird als eine positive reelle Zahl bestimmt, die das Ausmass der gegenseitigen Störung gleichzeitig verarbeiteter Sinuskomponenten auf der Basilarmembran bewertet.

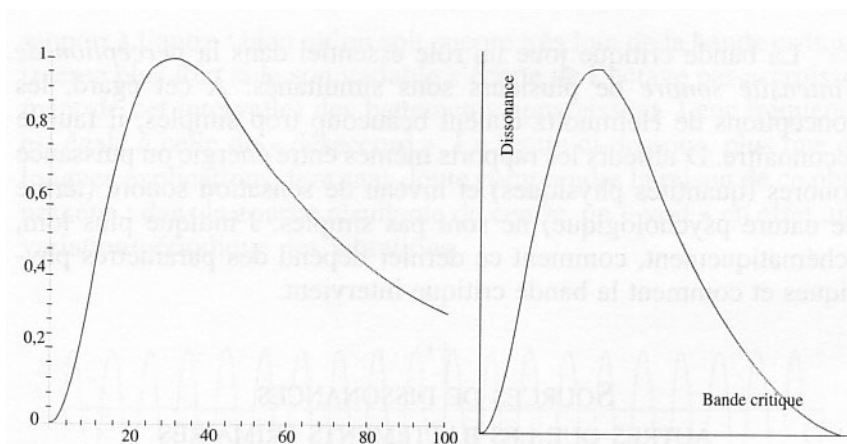
Hinter Helmholtz' Dissonanzauffassung steht als universelle Prämisse die Annahme, dass intermittierende Sinnesreizungen, wie sie durch flackerndes Licht, kratzende Berührung oder schwebende Zusammenklänge verursacht werden, immer als unangenehm und störend empfunden werden. Durch eine nicht konstante Reizung der immer gleichen Sinneszellen erhalten die Sinne einen intensiveren Eindruck als durch einen in der Stärke unveränderten

Dauerreiz, da die Nervenzellen bei Dauerreizung ohne zwischenzeitliche Erholungsphasen abstumpfen.

Dissonanzphänomene betreffen nach Helmholtz somit immer Konstellationen auf der Basilarmembran, bei denen mehrere Sinuskomponenten in das gleiche kritische Band fallen. Betrachtet man die Teilsummen solcher eng benachbarter Töne, erhält man Zeitfunktionen mit einem fluktuierendem Hüllkurvenverlauf. In einem Brief an du Bois-Reymond von 1857 bemerkt Helmholtz, wie bereits erwähnt, die unterschiedliche Empfindlichkeit von Auge und Ohr für intermittierende Reize [Kirsten 1986, 169]: Während Schwebungsfrequenzen von 15 Hz im Auge bereits zu kontinuierlichen Eindrücken führen, sei dies im Ohr erst bei etwa 150 Hz der Fall.

Aus Helmholtz' psychoakustischer Definition der Dissonanz über die Rauigkeit ergibt sich unmittelbar, dass Dissonanz im Unterschied zu früheren Konsonanztheorien abhängig von der Frequenzzusammensetzung und nicht nur vom Grundfrequenzverhältnis, dem musikalischen Intervall, der dargebotenen Töne ist.

Der *Lehre von den Tonempfindungen* [Helmholtz 1863] zufolge ist die durch Schwebungen zweier Sinustöne verursachte Rauigkeit nur von ihrer Frequenzdifferenz, nicht aber von ihrer Tonhöhe, abhängig. Für maximale Dissonanz zweier gleich lauter Sinustöne gibt Helmholtz auf Basis von Versuchen einen Wert von etwa 33 Schwebungen pro Sekunde an. Qualitativ ergibt sich daraus die folgende Abhängigkeit der Rauigkeit zweier Sinustöne gleicher Amplitude von ihrer Frequenzdifferenz:



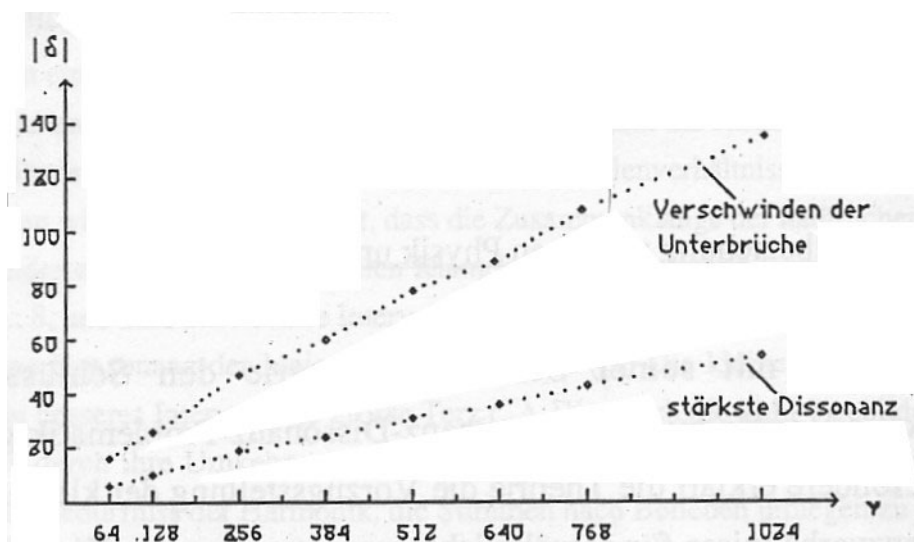
Vergleich Helmholtz' Rauigkeitsfunktion (links) mit der psychoakustischen Bewertung, wie sie sich aus der Vermessung der kritischen Bänder ergibt. [Quelle: Bailhache 2001, 173] Auffällig bei Helmholtz ist, dass er für viel größere Frequenzdifferenzen noch einen Einfluss auf die Rauigkeit annimmt. Korrigiert man Helmholtz' Rauigkeitsfunktion für Sägezahn-Violintöne, so erhält man – mit Ausnahme der Quinte (2 : 3) – für die klassischen Konsonanzen, weniger stark ausgeprägte Minima, das heisst eine Nivellierung der Konsonanzunterschiede [Bailhache 2001, 167].

Allgemein wird die Rauigkeit eines Sinustonpaars, im Folgenden auch *Schwebungspaar*, aus der Periodizität und der Schwankungsbreite der Hüllkurve ermittelt. Falls die beiden Sinustöne verschiedene Amplituden haben, erreicht die Einhüllende die Nullage nicht, vgl. für eine frühe bildliche Darstellung diejenige von Young [1800] in Kap. 1.3.

Zur Ermittlung der Gesamtrauigkeit werden die Rauigkeiten aller Schwebungspaare addiert. Mit diesem Berechnungsverfahren ergibt sich bei gleichen Grundfrequenzen eines Zusammenklangs eine starke Abhängigkeit der Dissonanz von der spektralen Zusammensetzung der dargebotenen Töne.

Während die Töne der grossen Septime (8 : 15) zweier Sinustöne mit den Frequenzen 220 und 412.5 Hz interaktionsfrei, das heisst mit Rauigkeit 0, übertragen werden, ergibt sich für eine Klangfarbe, bei welcher der erste Oberton 440 Hz des tieferen ähnlich stark wie der Grundton des höheren ist, wegen der Frequenzdifferenz $440 \text{ Hz} - 412.5 \text{ Hz} = 27.5 \text{ Hz}$ eine ziemlich starke Rauigkeit. Die Rauigkeit ändert, wenn das Intervall bei gleicher spektralen Zusammensetzung transponiert wird. Bei einer Versetzung um eine Oktave nach unten hat das Schwebungspaar die halbe Frequenzdifferenz (13.75 Hz) und ist demzufolge weniger rau. Und bei einer Versetzung um zwei Oktaven nach oben beträgt der kleinste Frequenzunterschied 110 Hz und die beiden Töne werden weitgehend interaktionsfrei übertragen. Die Transposition der Sinustöne verursacht erst bei sehr tiefen Frequenzen eine deutliche Rauigkeit.

Die Rauigkeit ist also abhängig von der spektralen Zusammensetzung der beiden Töne und zugleich, bei gleicher Gestalt der Spektren von der Lage der Grundfrequenzen im Frequenzraum.



Frequenzabhängigkeit der Rauigkeit zweier Sinustöne nach Mayer (1874) [Zahlen aus: Helmholtz 1896, 658]. Die Rauigkeitsmaxima nehmen im Wesentlichen linear mit der Frequenz zu, so dass die Klangfarbenabhängigkeit der Dissonanz von der Tonhöhe bestehen bleibt. [Quelle: Muzzolini 1991]

Nimmt man beispielsweise gedackte Zungenpfeifen, bei denen die geradzahligen Teiltöne fehlen, als Basis, so ergeben sich ganz andere Schwebungspaare als bei den ebenfalls teiltonreichen Sägezahnschwingungen, die Helmholtz für die Violinen ermittelt. Insbesondere haben reine Quinten und Oktaven zwischen gedackten Pfeifen keine koinzidierenden Obertöne, und eine geringfügige Verstimmung verursacht deshalb keine zusätzliche Schwebungspaare.

In diesem Zusammenhang schreibt Helmholtz zu den weiten gedackten Orgelpfeifen:

Sie sind an und für sich sehr weich, sehr sanft, in der tiefe dumpf, in der Höhe aber durchaus wohlklingend. Zu harmonischer Musik sind sie aber, wenigstens für unser modernes musikalisches Gefühl, gänzlich ungeeignet. [Helmholtz 1863, 309]

Der Grund für ihre Unbrauchbarkeit für harmonische Musik ist der *Mangel an Schwebungen* in den meisten Zusammenklängen, so dass sich die charakteristischen Unterschiede zwischen Konsonanz und Dissonanz verwischen:

Im Allgemeinen unterscheidet sich deshalb der Eindruck dissonanter Intervalle, mit Ausnahme der Sekunden, nur sehr wenig von dem der Konsonanzen, und die Folge davon ist, dass die Harmonie allen Charakter und der Hörer das sichere Gefühl für den Unterschied der Intervalle verliert. Wenn man

polyphone Compositionen mit den herbsten und kühnsten Dissonanzen auf dem gedackten Register der Orgel spielt, klingt alles fast gleichmässig weich und wohlklingend, aber deshalb auch unbestimmt, langweilig, schwächlich, charakterlos und energielos. [Helmholtz 1863, 309]

Demgegenüber eignen sich offene Pfeifen hervorragend für polyphone Musik:

Eine günstige Mitte für die harmonischen Anforderungen verwickelter polyphoner Musik bilden die Register der offenen Orgelpfeifen [...]. [Helmholtz 1863, 310]

Ideal zur Zeichnung von Konsonanz und Dissonanz sind Klangfarben, deren höchste vernehmbaren Teiltöne Ordnung sechs haben:

So bringt man Klangfarben hervor, welche die Obertöne in mässiger, nach der Höhe abnehmender Stärke bis zum sechsten hinauf enthalten, bei denen daher das Gefühl für die Reinheit der consonanten Intervalle sicher bestimmt ist, Consonanzen und Dissonanzen scharf unterschieden sind [...]. [Helmholtz 1863, 311]

Zarlinos *senario* erhält hier als Regulator für harmonische Klangfarben einen neuen Anwendungskontext! Derartig gebaute Klänge ermöglichen eine optimale klangliche Differenzierung bezogen auf die zeitgenössische Konsonanz/Dissonanz-Polarität.

In bestimmtem Besetzungskontext sind aber auch Klangfarben jenseits des *senario* anwendbar:

Ganz scharfe Klangfarben endlich erhält man durch die Zungenpfeifen und die Mixturen der Orgel. [...] Sie sind nur als Begleitung des Gemeindegesangs anwendbar; isolirt gebraucht machen sie einen unerträglichen Lärm und ein heillooses Gewirr von Tönen. [Helmholtz 1863, 311]

Scharfe, unangenehme Klangfarben sind als Bestandteil eines Zusammenklangs zulässig. Durch die Mischung mit dem Gemeindegesang geht ihre störende Schärfe verloren. Aus Sicht der Theorie der Periodiktöne Schoutens könnte die Schärfe via Periodiktonbildung, die Deutlichkeit der Tonhöhenwahrnehmung der Gemeinde und dadurch ihre Sicherheit im Mitsingen verbessern. Durch Mischung mit dem Gemeindegesang wird nach Helmholtz' Vorstellung das Gleichgewicht in der spektralen Verteilung wieder hergestellt. Die Argumentation erinnert an Praetorius' Deutung der Quintadena [vgl. Kap. [2.4.1](#)].

5.11. Ein- und Ausschwingvorgang, Spektraldynamik

In Zusammenhang mit der Negativdefinition der Klangfarbe kommt Helmholtz auf die Bedeutung der Ein- und Ausschwingvorgänge zu sprechen:

Zunächst ist indessen zu bemerken, dass man bisher im Allgemeinen geneigt war, alle möglichen verschiedenen Eigenthümlichkeiten der Klänge, welche nicht gerade deren Stärke und Tonhöhe betrafen, der Klangfarbe zuzuschreiben, was auch insofern richtig war, als der Begriff der Klangfarbe selbst eben nur negativ definirt werden konnte. Eine leichte Ueberlegung zeigt nun aber, dass manche von diesen Eigenthümlichkeiten der Klänge von der Art und Weise abhängen, wie die Klänge anfangen und enden. Die Arten des Anklingens und Ausklingens sind ja zum Theil so charakteristisch, dass sie für die menschliche Stimme durch eine Reihe verschiedener Buchstaben bezeichnet werden. Es gehören hierher nämlich die explosiven Consonanten B, D, G und P, T, K. [Helmholtz 1863, 114]

Wer ist „man bisher im Allgemeinen“? Mersenne, Rousseau, Willis?

Helmholtz möchte also die Aspekte Ein-/Ausschwingvorgänge und die eigentliche durch das Spektrum des stationären Teils eines Klanges definierte Klangfarbe entkoppeln. Die

folgenden Zitate zeigen eine differenzierte Beurteilung der klingenden Wirklichkeit vor dem Hintergrund seines abstrakten Klangfarbenkonzepts:

Wie bei diesen Buchstaben beruht auch der Unterschied des Klanges angeschlagener Saiten zum Theil auf der Schnelligkeit mit der sich der Ton verliert. [Helmholtz 1863, 115]

So liegt andererseits viel Charakteristisches darin, wie die Töne bei den Blechinstrumenten, der Trompete und Posaune, meist abgebrochen und schwerfällig ansetzen. [Helmholtz 1863, 115]

Aber auch wenn ein Klang mit gleicher oder veränderlicher Stärke andauert, mischen sich ihm bei den meisten Methoden seiner Erregung Geräusche bei als der Ausdruck kleinerer oder grösserer Unregelmässigkeiten der Luftbewegung. Bei den durch einen Luftstrom unterhaltenen Klängen der Blasinstrumente hört man meistens mehr oder weniger Sausen und Zischen der Luft, die sich an den scharfen Rändern der Anblaseöffnung bricht. Bei den mit dem Violinbogen gestrichenen tönenden Saiten oder Stäben und Platten hört man ziemlich viel Reibegeräusch des Bogens. [Helmholtz 1863, 116]

Wenn nun aber auch in den begleitenden Geräuschen, also in den kleinen Unregelmässigkeiten der Luftbewegung, viel Charakteristisches für die Töne der musikalischen Instrumente und für die Töne der menschlichen Stimme bei verschiedenen Mundstellung liegt, so bleiben doch auch noch genügend Eigenthümlichkeiten der Klangfarbe übrig, die an dem eigentlich musikalischen Theile des Klanges, an dem vollkommen regelmässigen Theile der Luftbewegung haften. [Helmholtz 1863, 117]

Wir wollen in dem vorliegenden Abschnitte zunächst von allen unregelmässigen Theilen der Luftbewegung, vom Ansetzen und Abklingen des Schalles absehen, und nur auf den eigentlich musikalischen Theil des Klanges, welcher einer gleichmässig anhaltenden, regelmässig periodischen Luftbewegung entspricht, Rücksicht nehmen, und die Beziehungen zu ermitteln suchen zwischen dessen Zusammensetzung aus einzelnen Tönen und der Klangfarbe. Was von den Eigenthümlichkeiten der Klangfarbe hierher gehört, wollen wir kurz die *musikalische Klangfarbe* nennen. [...] Es stellen sich dabei gewisse allgemeine Regeln heraus für diejenigen Anordnungen der Obertöne, welche den in der Sprache als *weich, scharf, schmetternd, leer, voll* oder *reich, dumpf, hell* u.s.w. unterschiedenen Arten der Klangfarbe entsprechen. [Helmholtz 1863, 118]

Die Amplitudenspektren periodischer Klänge enthalten die Information dieser Klangattribute. Ausgehend von der Zeitfunktion ist die Bedeutung der genannten Adjektive auf Charakteristika der Kennzahlenfolgen abgebildet. Eine quantitative Bewertung der Spektraldynamik findet sich bei Helmholtz nicht.

6. Die Phasenfrage

Die Frage des Einflusses der Phasenbeziehung zwischen den verschiedenen simultanen Sinuskomponenten auf die Hörempfindung, im folgenden auch die „Phasenfrage“ genannt, ist für das psycho-akustische Verständnis der Klangfarbe von grosser Wichtigkeit. Sie wird von Seebeck in Anschluss an Ohms Anwendung der Fourieranalysis auf die Akustik bereits 1843 angesprochen und von Helmholtz experimentell zu klären versucht. Die Rezeption der Helmholtz'schen Theorie der Schallverarbeitung ist bis zum Ende des 19. Jahrhunderts von dieser Frage geprägt. Die Diskussion nimmt zwar immer auch Bezug auf die Auseinandersetzung zwischen Ohm und Seebeck, geht aber inhaltlich nicht über das hinaus, was bei Helmholtz nachzulesen ist.

Die bereits besprochenen Positionen von Ohm, Seebeck und Helmholtz werden hier noch einmal zusammenfassend aufgegriffen. Die Texte von König, Thomson, Hermann als eigenständige Antworten auf Helmholtz' Theorie rechtfertigen eine ausführliche Darlegung.

Die Phasenfrage hängt direkt mit der Definition des Tons als elementare Empfindungsgrösse zusammen. Die zu berücksichtigenden Erscheinungen sind von vielfältigster Natur, was eine Systematisierung erschwert. Zu nennen sind Schwebungen, Schwebungen höherer Ordnung, Kombinationstöne, subjektive Obertöne, Residualtöne, unhörbare Teiltöne, Schwellwerte, Verdeckungserscheinungen. Im Laufe des 19. Jahrhunderts werden alle diese Elemente in die Diskussion einbezogen.

Die Mathematik der periodischen Funktionen ist mit der Präzisierung des Satzes von Fourier durch Dirichlet (1826) eine vollständige Theorie, allerdings wird ihr topologischer Aspekt, nämlich die Möglichkeit, periodische Funktionen als Punkte in euklidischen Vektorräumen zu interpretieren, in dieser Zeit nicht thematisiert. Das Vorhandensein einer kanonischen Metrik erlaubt es nämlich, Abstandsbeziehungen und Winkel zwischen Klangspektren zu definieren und es stellt sich die Frage, inwieweit die durch solche Metriken definierten räumlichen Verhältnisse eine psychologisch relevante Entsprechung haben. Es sieht so aus, als ob eine direkte räumliche Deutung der Klangfarbe erstmals von einem Komponisten und Musiktheoretiker vorgeschlagen wird und nicht aus der Ecke der Mathematik stammt: von Arnold Schönberg im Schlussabschnitt seiner Harmonielehre (1911).

Die Erforschung der Phasenproblematik hängt im 19. Jahrhundert stark mit den technisch begrenzten Möglichkeiten zur Erzeugung von Schall mit vordefinierten Eigenschaften zusammen.

Aber auch dem Beobachten der relevanten Eigenschaften sind Grenzen gesetzt. Die Visualisierung unsichtbarer Prozesse in Echtzeit ist bis heute nicht unproblematisch, denn kein Glied der jeweiligen Übertragungskette arbeitet völlig verzerrungsfrei. Das Vibrationsmikroskop von Helmholtz, ein Vorläufer der modernen Oszilloskope, macht die Schwingungsform klingender Körper sichtbar, zum Beispiel diejenige der gestrichenen Violine, nicht aber den an die Luft abgegebenen, durch den Resonanzkörper modifizierten Schalldruckverlauf.

Die Frequenz von Sirenentönen kann durch Messung der Drehgeschwindigkeit sehr genau kontrolliert werden, nicht aber die Signalgestalt des erzeugten Schalls. Nicht einmal die Herstellung von reinen, „einfachen“ Sinustönen ist einfach. Deshalb kann bei Schwebungen in verstimmten Oktaven (und anderen verstimmten, vom Einklang verschiedenen Intervallen mit einfachen Zahlenproportionen) nicht zweifelsfrei festgestellt werden, ob sie gewöhnliche Schwebungen zwischen Teiltönen sind oder ob sie von einer direkten Interaktion der beiden

Grundfrequenzen herrühren. Es wird deshalb von Helmholtz und Hermann gegen die Versuche von Koenig und Thomson mit Stimmgabeln eingewendet, die Versuchstöne seien nicht völlig obertonfrei, sie seien keine hinreichend guten Sinustöne. Und falls die beobachtbaren Phänomene auf Nicht-Linearitäten zurückzuführen sind, stellt sich die Frage nach ihrer Lokalisierung. Entstehen sie objektiv in der Luft, bei der Übertragung auf das Trommelfell, bei ihrer Weiterleitung auf die Basilarmembran oder erst bei der neuronalen Weiterverarbeitung des Schallreizes.

Ganz ähnlich wurde 25 Jahre früher die von Seebeck angenommene Signalgestalt der Lochsirenentöne von Ohm bezweifelt. Die Fourieranalyse kann natürlich nur dann angewandt werden, wenn der Schalldruckverlauf hinlänglich bekannt ist. Eine direkte, simultane Beobachtung des Schalldruckverlaufs ist mit den Messinstrumenten der Mitte des 19. Jahrhunderts nicht möglich.

Die Unterscheidung zwischen äusserem und innerem Spektrum ist hilfreich. Das innere Spektrum widerspiegelt die Intensitätsverhältnisse an denjenigen Stellen der Basilarmembran, von denen aus Reize an das Gehirn weitergeleitet werden. Kombinationstöne und subjektive Obertöne sind in diesem Erregungsmuster real vorhanden. Die Phasenfrage orientiert sich in neuerer Zeit am inneren Spektrum. Der strenge Nachweis der Periodiktöne hat zu zeigen, dass sie nicht auf bekannte Effekte zurückführbar sind, dass sie im inneren Spektrum nicht vorhanden sind. Für Hörversuche heisst dies, die Entstehung von Differenztönen und subjektiven Obertönen zu verhindern oder zu kontrollieren und die Periodiktöne durch eine andere Wirkungsweise von anderen Tönen zu unterscheiden.

6.1. Ohm – Seebeck

Die Diskussion um das Wesens des Tons wird um 1840 in voller Schärfe geführt. Auslöser ist die Anwendung der Fourieranalyse auf die Akustik durch Georg Simon Ohm. Einfache Töne sind Sinustöne. Die anderen periodischen Schallsignale sind aus mehreren Sinuskomponenten zusammengesetzt und verursachen deshalb immer eine zusammengesetzte Empfindung. Der entscheidende Punkt dabei ist, dass das mathematische Verfahren der Zerlegung periodischer Signale in Sinustöne nach Ohms Auffassung eine von ihm nicht näher untersuchte oder begründete physiologische Entsprechung haben soll. Die Sinusschwingungen, die Bausteine der Fourierzerlegung, wären also zugleich die Normbausteine der Wahrnehmung.

Eine unmittelbare Konsequenz dieser strengen Auffassung besteht darin, dass Kombinationstöne nur durch eine Nicht-Linearität bei der Superposition in der Luft gedeutet werden können, denn sie entsprechen ja Frequenzkomponenten, die in den beiden primären Tönen nicht vorhanden ist. Ohm wusste aber durchaus von den Kombinationstönen!

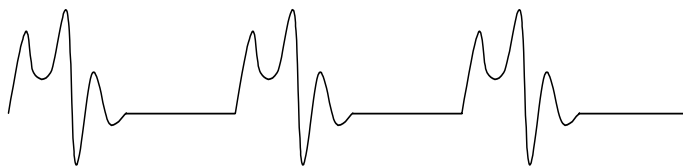
August Seebeck schliesst sich nicht gegen die Möglichkeiten der Fourieranalyse als Beschreibungswerkzeug, bezweifelt aber Ohms naive Anwendung auf die Tonwahrnehmung. Mithilfe einer Lochsirene erzeugt er Töne, die sich gemäss seiner Vorstellung in ihrem Zeitverlauf als Impulsschwingungen beschreiben lassen. Die Fourieranalyse solcher periodischer Impulsfunktionen zeigt, dass die Grundfrequenzkomponente in Sirenentönen im Allgemeinen nicht dominiert. Dennoch sind gemäss Seebeck die Obertöne kaum wahrnehmbar. Der Ton zur zugehörigen Periodendauer, die Grundfrequenz, wird mit einer Deutlichkeit gehört, die nicht die Amplituden- bzw. Schallpegelverhältnissen im Frequenzspektrum widerspiegelt.

Als Antwort darauf bezweifelt Ohm, dass der Schalldruck zwischen zwei Impulsen zur Ruhelage zurückkehrt. Er weist auch die Möglichkeit des Vorhandenseins der Grundfrequenz

in periodischen Impulsen nach, kann aber gegen die von Seebeck berechneten Amplitudenverhältnisse der Partialtöne nichts einwenden.

Seebeck bemerkt, dass unter der Annahme der Ohmschen Definition des Tons, die Nullphase keine Rolle spielen könne, es wird dabei allerdings nicht ganz klar, ob sich diese Aussage nur auf einzelne Sinustöne bezieht oder auch auf die gegenseitigen Phasenbeziehungen bei der gleichzeitigen Darbietung mehrerer Sinustöne. Eine strenge Auslegung der Ohm'schen Definition des Tons beinhaltet diese verschärfte Aussage, denn eine Vielheit von wahrgenommenen Tönen entspricht ihr zufolge eins-zu-eins einer Vielheit von Sinustönen. Dies ist nur dann möglich, wenn die Teiltöne unabhängig von einander übertragen werden. Diese Unabhängigkeit bedeutet, dass aus der Phasenunabhängigkeit der Einzeltöne diejenige des Gemischs folgt.

Im letzten Beitrag der Ohm/Seebeck-Kontroverse untersucht Seebeck die spektrale Zusammensetzung allgemeiner periodischer Funktionen, die auf einem Teil des Intervalls konstant 0 sind, das heisst von periodischen Impulsfunktionen mit beliebigem Funktionsverlauf während eines „Impulses“:



Ändert man bei einer stückweise konstanten Schwingung in der Art des Beispiels die Nullphase eines einzigen im Spektrum vorhandenen Teiltönen um eine halbe Periode, so erhält man eine periodische Funktion, die keine verallgemeinerte periodische Impulsfunktion mehr ist: Im ehemals konstanten Bereich wird dieser Teilton als negatives „Nachbild“ sichtbar. Die gewählte Phasenverschiebung bewirkt nämlich bei diesem Teilton einen Vorzeichenwechsel.

Diese Verallgemeinerung erlaubt es Seebeck vom Nichtwissen über die Details im Schalldruckverlauf zu abstrahieren, ohne in Unverbindlichkeit zu geraten.

Seebeck behauptet eine Kopplung der Partialtöne: Klänge, bei denen die ersten paar Teiltöne fehlen, lassen im Signalverlauf die Periodizität deutlich erkennen und verursachen, so vermutet er, einen Ton zur Periodizität des Summensignals. Die sich bei einer grafischen Repräsentation solcher Klänge dem Auge zeigende Periodizität kann aber im Gehör nur dann einem betreffenden Periodikton hervorrufen, wenn die Teiltöne nicht unabhängig von einander übertragen werden und sich die Periodizität durch ihr Zusammenwirken als Ton manifestiert.

Kann ein Partialton nicht isoliert wahrgenommen werden, so trägt seine Energie nach Seebecks Auffassung zur Deutlichkeit des betreffenden Grundtons bei. Schoutens Deutung der Periodiktone beruht darauf, dass intervallmässig nahe liegende Teiltöne nicht aufgelöst werden und am Ort ihrer Wirkung auf der Basilarmembran gemeinsam die Periodiktonempfindung auslösen, nicht etwa an der Stelle der Grundfrequenz [Schouten, 1940]. Diese Überlegungen Seebecks nehmen Elemente der modernen Residualtontheorie vorweg, allerdings mit rein technischen Argumenten ohne gehörphysiologische Fundierung.

Aussagekräftige Experimente zur Phasenfrage sind zu diesem Zeit technisch kaum zu bewerkstelligen und meines Wissens (mit Ausnahme der elementaren Versuche zu

Auslöschung, Verstärkung und Schwebungen) noch nicht durchgeführt worden. Ein Grund dafür ist, dass die Signalgestalt eines Tons nur in Ausnahmefällen rechnerisch bestimmt werden kann, nämlich dann wenn die Bewegungsgleichungen und die Resonanzcharakteristik, das heisst der ganze schallerzeugende Vorgang bekannt ist.

Sirenentöne sind, falls über ihren Signalverlauf als Impulsschwingungen Klarheit herrscht, als Testtöne ebenso geeignet wie Sinustöne. Ihr Teiltonreichtum (in der Fourier-Perspektive) macht Sie zum idealen Gegenpart zur einfachen Sinusschwingung.

Ähnlich wie bei den Zungenpfeifen mit ausziehbarer Resonanzröhre (Willis 1832) können periodische Impulsfunktionen durch Variation der Grundfrequenz bei konstant gehaltener Impulsdauer zum Studium der Formanten beigezogen werden, falls es gelingt die Impulsbreite zu kontrollieren. Eine bloss Erhöhung der Umlaufgeschwindigkeit der Scheibe hat im Unterschied dazu eine Streckung der Zeitfunktion zur Folge. Die Impulsdauer wird bei höherer Frequenz entsprechend kürzer und die Gestalt des Amplitudenspektrums ändert sich dabei nicht. Die Variation der Drehgeschwindigkeit erlaubt es, falls kein Resonanzkörper verwendet wird, gestaltähnliche Spektren auf verschiedene Tonhöhen zu transponieren. Bei einem relativen Klangfarbenverständnis darf sich dabei die Klangfarbe nicht ändern.

Verschiedene Drehzahlen der Scheiben müssen zur Erzeugung formantähnlicher Spektren durch Variation des Löcherdurchmessers kompensiert werden. Dabei sollte sich ein allfälliger Vokalcharakter nicht ändern, falls die Grundfrequenz die Formantfrequenz nicht übersteigt.

6.2. Helmholtz

Deutet man eine zusammengesetzte Empfindung als gewöhnliche Überlagerung, als Summe von einfachen, voneinander unabhängigen Empfindungen, gelangt man zu der von Helmholtz behaupteten Insensitivität für Phasenrelationen, die sich aus Ohms Definition des Tons ergibt: Der Hörvorgang beinhaltet (auf der mechanischen Stufe) eine Zerlegung des auftretenden Klanges in einfache Töne. Unterscheidbar sind zwei musikalische Klänge höchstens dann, wenn sie aus verschiedenen Frequenzen zusammengesetzt sind oder wenn die gleichen Frequenzkomponenten unterschiedliche Stärke aufweisen, nicht aber wenn sie sich bloss in den Phasenrelationen unterscheiden. Anders ausgedrückt, das Gehör verwendet bei seiner Schallanalyse nur die Amplituden- nicht aber die Phaseninformation. Da von dieser Phaseninformation aber die Zeitgestalt eines Schallsignals abhängt, kann die Zeitgestalt aus der Amplitudeninformation allein nicht rekonstruiert werden. Die Schallanalyse leistet also zugleich eine Aufteilung von Schallsignalsignalen in Klassen ununterscheidbarer Klänge. Die Elemente einer solchen Klasse sind die Schallsignale mit gleichem Amplitudenspektrum. Wie unterschiedlich die Signalgestalt eines periodischen Signals allein durch Variation der Phasenrelationen ausfallen kann, wurde in Kapitel [5.2](#) gezeigt.

Helmholtz geht davon aus, dass die Phasenbeziehungen für die Interpretation üblicher Umweltreize insbesondere auch für die sprachliche Kommunikation keine Rolle spielen darf, da sie bei gleicher Schallquelle je nach Position der Empfänger und Raumakustik erheblichen Schwankungen unterliegen. Ihre Nichtbeachtung ist deshalb für die Kommunikation von Vorteil.

Bei Helmholtz ist die Phasenfrage untrennbar verknüpft mit seiner Theorie der mechanischen Verarbeitung des Schalls im Gehör. Die von ihm aufgestellte Ortstheorie der Frequenzverarbeitung hat für gleichzeitig dargebotene Schallreize zwei Komponenten:

- Sinustöne mit genügend grossem Frequenzabstand werden ungestört übertragen.
- Eng benachbarte sinusförmige Frequenzkomponenten können nicht ohne gegenseitige Beeinflussung übertragen werden.

Die Phasenfrage wird von Helmholtz nur für den ersten Fall untersucht, denn Schall, der die erste Bedingung nicht erfüllt, gehört seiner Definition zu Folge nicht zu den musikalisch brauchbaren Klangfarben.

Der physiologische Mechanismus, der ein solches Verhalten zeigt, wird von Helmholtz mit einem System von Saiten verglichen, die je auf eine individuelle Frequenz abgestimmt sind und die durch die entsprechenden Frequenzkomponenten des auftretenden Schalls in Resonanz versetzt werden. Die Basilarmembran, die dieses System von Saiten umsetzt, steht gemäss Helmholtz unter hoher Quer- aber geringer Längsspannung, so dass sich benachbarte Resonanzstellen gegenseitig nur wenig beeinflussen. Das System von Saiten ist also in Querrichtung mit losen Fäden verwoben, so dass die einzelnen Saiten nie ganz ohne Wirkung auf ihre Nachbarinnen schwingen. Die Vorstellung findet sich schon bei de Mairan [1737, vgl. Kap. [3.1.4](#)].

Aus der genannten Vermutung zu Quer- und Längsspannung ergibt sich, dass Helmholtz' Resonanztheorie keine exakte Übereinstimmung von anregender und angeregter Frequenz erfordert. Die Längsspannung auf der Basilarmembran bewirkt, selbst dann wenn die mitschwingenden, quergespannten Fasern eine ideale Frequenzauflösung hätten, dass eine auf eine Faser abgestimmte Sinuskomponente des auftretenden Schalls immer einen örtlich ausgedehnten Bereich, und nicht nur eine einzelne Faser, in Mitschwingen versetzt.

Die Schallanalyse auf der Basilarmembran besteht demnach in einer örtlichen Auftrennung bei der Absorption der Schallenergie. Dieses Verständnis der Tonhöhenverarbeitung wird Ortstheorie genannt. Helmholtz ist nicht der erste, der eine Ortstheorie vertritt. Schon 1683 äusserte Guichard Joseph Duverney eine solche Auffassung [vgl. Békésy et al. 1948, 739–741 und Kap. [2.5.5](#)].

Wie Békésy nachweist, ist die Vorstellung des Systems leicht gekoppelter Saiten nur eine Metapher, denn die Basilarmembran steht nicht unter Spannung, es können sich deshalb auf ihr auch keine stehenden Wellen, das heisst Transversalschwingungen auf den Quersaiten, entwickeln. Die örtliche Zerlegung des in die Schnecke eindringenden Schalls ist gemäss Békésy als Folge einer Wanderwelle in der Schneckenflüssigkeit, die zu einer zeitabhängigen Deformation der Basilarmembran führt, zu erklären.

Dennoch lassen sich mit Helmholtz' Resonanztheorie alle im 19. Jahrhundert bekannten psychoakustischen Effekte erklären. Allein der Resonanzbegriff ist so weit zu fassen, dass er von den aktuellen mechanischen Verhältnissen abstrahiert. Sogar Effekte der Tonhöhenabhängigkeit von der Lautstärke eines Tons lassen sich damit erklären.

Der zweite Aspekt der Helmholtz'schen Klangverarbeitungstheorie betrifft die Gleichzeitigkeit eng benachbarter Töne, die Schwebungen. Langsame Schwebungen werden als periodisch an- und abscwellender Ton entsprechend dem Verlauf der periodischen Hüllkurve empfunden und nicht als zwei gleichzeitige stationäre Töne. Schnellere Schwebungen äussern sich in Form von Rauigkeit des Zusammenklangs. Schwebungserscheinungen können in Helmholtz' Terminologie nur bei Zusammenklängen musikalischer Klänge (konsonanten und dissonanten) oder bei musikalisch unbrauchbaren Klangfarben auftreten, nicht bei *musikalischen* Einzelklängen.

Das zu einer Schwebung gehörige Zeitsignal kann mathematisch sowohl als Produkt von Sinusschwingungen als auch als Summe von Sinusschwingungen interpretiert werden. Bei Schwebungen ist somit die mathematische Produktdarstellung die physiologisch und psychologisch adäquatere, bei genügendem Frequenzabstand hingegen die Summendarstellung. Die Produktdarstellung bringt also die nicht interaktionsfreie Übertragung der Frequenzkomponenten zum Ausdruck.

In diesem Zusammenhang ist auch die zeitliche Auflösung der Frequenzanalyse in Rechnung zu ziehen. Im Resonanzmodell hängt sie mit der Dämpfung zusammen: Je grösser die Dämpfung, desto besser die zeitliche Auflösung, aber auch desto schlechter die Frequenzauflösung. Dieser Zusammenhang gilt generell für mechanische und elektrische Resonanzsysteme und er wird von Helmholtz ausführlich dargelegt [Helmholtz 1863, 75, 217]. Der wahrgenommene Alltagsschall ist in der Regel nicht stationär und ein langsames Ausklingen der angeregten Cortischen Fasern hätte einen störenden Nachhalleffekt zur Folge und somit verheerende Konsequenzen für die Sprachverständlichkeit.

Die Gültigkeit des Phasengesetzes widerspricht nicht einer Gleichsetzung von Tonhöhe und Periodizität. Die Tonhöhe könnte ja auf neuronaler Ebene aus dem Spektrum neu „berechnet“ werden [vgl. zum Beispiel Goldstein 1973]. Ein solcher Mechanismus ist im Rahmen einer reinen Ortstheorie zur Erklärung der Musikübertragung oder tiefer Männerstimmen am Telefon – wo die Frequenzen unterhalb 260 Hz nicht übertragen werden, erforderlich.

Das Phasengesetz ist eine Konsequenz des Ohmschen Gesetzes und wird von Helmholtz zu seiner Verifikation verwendet. Tatsächlich folgt auch umgekehrt aus der Insensitivität für Phasenverhältnisse das Ohmsche Gesetz, d.h. das Wesen des Sinustons als elementare Empfindungsgrösse, falls Änderungen der Amplitudenverhältnisse zu Klangfarbenänderungen führen.

Helmholtz' Phasenversuch [vgl. Kap. 5.6]. Die Einrichtung darf als erster additiver Klangsynthesizer angesehen werden. Eine Reihe von Stimmgabeln, die auf die Partialtöne eines periodischen Klanges gestimmt sind, wird vom gleichen elektrischen Schwingkreis angeregt. Die Phasen der Teiltöne sind individuell einstellbar.

Problematisch dabei sind [vgl. Helmholtz 1863, 182-196]:

- die Zeitspanne, einige Sekunden, die zur Umstellung der Phasenrelationen benötigt wird.
- Helmholtz' Definition des musikalischen Klangs: ein Klang ist nur dann musikalisch, falls die Teiltöne sich nicht gegenseitig stören, d.h. bei Rauigkeit 0. Dies kann nur erreicht werden, wenn nur Teiltöne tiefer Ordnung ($n \leq 6$) vorkommen oder wenn genügend grosse Lücken im Spektrum vorliegen. Helmholtz vermutet, dass andernfalls Phaseneffekte vermutlich eine Rolle spielen. Dieser Punkt ist in der zeitgenössischen Rezeption übersehen worden, wird aber später verschiedentlich aufgegriffen.
- Möglicherweise stehen die einzelnen Stimmgabelfrequenzen nicht exakt in ganzzahligem Verhältnis. In diesem Falle entstünden in jedem Fall sich ständig ändernde Phasenbeziehungen. Die Versuchsanordnung ist diesbezüglich noch zu überdenken, wie hängen Anregungs- und Resonanzfrequenz zusammen. Eine gegenüber der Stimmgabel minim verstimte Resonanzröhre hat bereits einen Klang mit modulierender Phasenlage zum Restklang zur Folge.
- Die Änderung der Teiltonphasen ist – apparativ bedingt – gleichzeitig mit einer kleinen Änderung der Amplituden verbunden. Phasen- und Amplitudeneffekte könnten also nur schlecht auseinandergehalten werden.
- Die räumliche Trennung der verschiedenen Sinuskomponenten. Eine Veränderung der Position des Beobachters bewirkt eine Veränderung der Phasenverhältnisse. (Dieser Punkt ist meines Wissens noch nie formuliert worden.) Die räumliche Trennung kann aber auch als Vorteil angesehen werden, falls die Position des Beobachters stabilisiert wird. Wie sich bei der Synthese von digitalen Signalen zeigt, können nach der D/A-Wandlung an der letzten Stelle der Übertragungskette, nämlich am

Lautsprecher/Kopfhörer, beträchtliche Phasenverzerrungen entstehen. Dies ist in Helmholtz Anordnung ausgeschlossen.

6.3. Thomson (1877)

Simple tone “=” simple harmonic function of time

Thomson bemüht sich sehr um einen konsistenten wissenschaftlichen Sprachgebrauch akustischer Termini im Englischen. In Anlehnung an die Terminologie von Helmholtz verwendet er *tone* oder *simple tone* für einen Schall, dessen Schalldruckverlauf sich in der Nähe des Ohrs sinusförmig ändert, der also eine „simple harmonic function of time“, eine einfache Sinusschwingung sei. Der Begriff *tone* enthält dadurch auch im Englischen eine weitere Bedeutung, neben derjenigen als Intervall des Ganztons, die sich aber aus dem jeweiligen Kontext klar von einander scheiden lassen. Den Empfindlichkeitsbereich für Sinustöne schätzt er wie heute üblich von 30 – 20'000 Hz. Die Bewegung der einzelnen Luftteilchen, die durch einen harmonischen Oszillator verursacht wird, ist dabei entweder harmonisch in einer Dimension, gleichmässig kreisförmig oder elliptisch, falls die Maximalgeschwindigkeit des Oszillators und diejenige der vibrierenden Luft vernachlässigbar klein im Vergleich zur Schallgeschwindigkeit ist. Die Bahnkurven der letzten beiden Fällen ergeben sich durch Superposition zweier Sinusschwingungen gleicher Frequenz in verschiedenen Raumrichtungen [Lissajous-Figuren, vgl. Descartes: Kap. [2.4.3](#)].

The vibrations of the air produced by a simple harmonic vibrator are either simple harmonic, or are in circular or elliptic orbits, resulting from the composition of two simple harmonic motions; and the consequent change of air-pressure in the neighbourhood of the ear follows the simple harmonic law, provided the maximum velocity of the vibrator and of the air in its neighbourhood be infinitely small in comparison with the velocity of sound. Hence the more nearly this condition is fulfilled the nearly a simple tone is the sound heard; [...] [Thomson 1877, 602]

Je besser diese Geschwindigkeitsbedingung erfüllt ist, desto eher wird auch ein „einfacher“, das heisst ein nicht zusammengesetzter Ton, gehört. Dies ist eine physikalisch äusserliche Bedingung, das heisst sie erlaubt nur den Ausschluss äusserlicher nicht-linearer Effekte und garantiert, dass die von einem harmonisch schwingenden Schallgeber ausgehende Welle in der Nähe des Empfängers auch als Sinusschwingung ankommt. Diese Geschwindigkeitsbedingung, auf ein Teilchen angewandt, fordert für höhere Frequenzen eine umgekehrt proportional kleinere Maximalamplitude, da bei höheren Frequenzen und gleicher Amplitude, die Geschwindigkeit beim Nulldurchgang (und somit auch die kinetische Energie) grösser ist als bei tieferen Frequenzen. Falls die Bedingung erfüllt ist, können aus einer sinusförmig schwingenden Schallquelle keine zusätzlichen „objektiven Obertöne“ als Folge einer nicht-linearen Übertragung entstehen. Die Besonderheit der Schallverarbeitung durch das Gehör wird dabei ausser acht gelassen. Im Prinzip könnte eine analoge Bedingung für die Schallübertragung zwischen der Aussenluft und der Basilarmembran via Trommelfell aufgestellt werden, um sicherzustellen, dass auf der Basilarmembran nur eine einzige, schmale Zone angeregt wird. Dies führt zu einer physiologischen Definition des einfachen Tones, bei der die Entstehung von „subjektiven Obertönen“ als Folge einer Signalverzerrung zwischen Trommelfell und Basilarmembran ausgeschlossen ist.

Harmony – note – overtones – quality of sound – frequency

Eine *Harmonie* ist bei Thomson durch einen streng periodischen aber nicht sinusförmigen Schalldruckverlauf definiert. Sie kann als Summe von Sinustönen, deren Perioden ganzzahlige Teiler ihres tiefsten Tons sind, beschrieben werden. Thomson spricht in diesem

Zusammenhang von „Fourier’s beautiful analysis“ [Thomson 1877, 603]. In musikalischer Praxis sei der Harmoniebegriff in denjenigen Spezialfällen, bei denen der Grundton im Sinneseindruck dominiere, nicht anwendbar. Thomson verwendet in diesem Fall den Begriff der *Note* (*note*) als Äquivalent für den Helmholtz’schen *Klang*. (*Sound* kommt wegen der Mehrdeutigkeit *Schall*, *Klang*, *Ton* dafür nicht in Frage.) Die vom Grundton verschiedenen konstituierenden Töne heissen dann *Obertöne* (*overtones*) und „are merely felt as giving it its character or quality of sound“ [Thomson 1877, 603]. Sie werden nur so empfunden, als dass sie der Note ihren Charakter oder ihre Klangqualität geben. Man wäre versucht zu ergänzen: und dass sie dann in der Regel nicht individuell herausgehört werden oder zumindest, dass ihnen keine individuelle musikalische Bedeutung z. B. als Melodieträger zukommt.

In Anlehnung an Lord Rayleigh und Professor Everett wird der Begriff der *Frequenz* auf beliebige Harmonien angewendet und nicht bloss auf Sinustöne. Er bezeichnet den Kehrwert der kürzesten Periodendauer einer Harmonie [Thomson 1877, 604]. [Die Begriffe Periodizität und Wiederholungsrate sind in denjenigen Fällen, wo nicht von Sinustönen die Rede ist, unverfänglicher.]

Der Begriff der *Qualität* wird von Thomson ebenfalls auf allgemeine Harmonien, und nicht bloss auf durch Noten repräsentierte Klänge, angewandt:

The quality of a harmony, when the periods of its several constituent tones are given, depends upon the amplitudes of the different constituents, and on the relation of their phases. [Thomson 1877, 604]

Die Klangqualität einer Harmonie ist, falls die vorkommenden Teiltonfrequenzen gegeben sind, abhängig von den Amplituden und von den Phasenrelationen der Teiltöne. Dies ist die zentrale Aussage, und sie scheint im offenen Widerspruch zum Ohmschen Gesetz und zu der von Helmholtz behaupteten Insensitivität des Gehörs für Phasenrelationen zu stehen. Dennoch würde ihr Helmholtz vermutlich zustimmen, denn Thomsons Harmoniebegriff ist wesentlich umfassender als derjenige der *musikalisch brauchbaren Klänge* von Helmholtz. So stellt beispielsweise die Überlagerung zweier Violintöne (Sägezahnschwingungen) im Abstand einer rein gestimmten kleinen Terz eine Harmonie im Sinne von Thomson dar. Die Helmholtz’sche Rauigkeitsfunktion hat an dieser Stelle zwar ein lokales Minimum, sein Wert ist aber grösser als Null. Das heisst der Zusammenklang ist nicht schwebungsfrei, und dies stellt einen Phaseneffekt innerhalb einer – periodischen – Harmonie dar.

binary harmony – beats

Thomson stellt mit Hilfe eines Satzes von mit Resonatoren versehenen Stimmgabeln von Koenig Versuche mit geringfügig verstimmten Harmonien aus zwei Teiltönen durch, die den Einfluss der Phasenrelation auf die Klangempfindung testen. Die Verstimmung ist dabei so klein, dass sich die Schwingungsform über viele Perioden des unverstimmten Referenzklangs nur unwesentlich ändert. Die Modulation der Schwingungsform müsste sich also als Modulation der Klangqualität bemerkbar machen, wenn die Phasenrelation der Teiltöne einen Einfluss auf die Klangempfindung hat. Denn während einer Zeitdauer konstanter Schwingungsform, ist die verstimmte nicht von einer vollkommenen Harmonie zu unterscheiden. Wenn also zwei solche Zeitabschnitte verschieden klingen, kann dies nur an der unterschiedlichen Phasenbeziehung der beiden Töne liegen, Frequenz und Amplitude der Konstituenten sind ja invariant. Thomsons Methode besteht also darin, mit Hilfe quasi-periodischer Klänge Aussagen über periodische Klänge zu gewinnen. Die Untersuchungen von ter Kuile (1902) verwenden das gleiche Verfahren. Eine mathematische Theorie quasi-periodischer Funktionen, das heisst der Funktionen, die sich als Summe periodischer

Funktionen darstellen lassen, die aber selbst nicht periodisch sein müssen, wird von H. Bohr um 1923 [vgl. Kap. 8.2] entwickelt.

Natürlich sind als Versuchsharmonien nur vom Einklang wesentlich abweichende Intervalle interessant, innerhalb der Oktave etwa Quinte ($2 : 3$), kleine Sexte ($5 : 8$) und grosse Sexte ($3 : 5$). Die modulierende Lautstärke in der Nähe des Einklangs ist ja unbestritten.

Eine (*vollkommene*) *binäre Harmonie* besteht aus zwei Sinustönen mit rationalem Grundfrequenzverhältnis (wobei die Verhältniszahlen klein gegenüber den Frequenzen sind).

Eine *unvollkommene binäre Harmonie* entsteht durch eine geringfügige Verstimmung einer der beiden Töne einer vollkommenen binären Harmonie. Sie stellt somit den einfachsten Spezialfall einer quasi-periodischen Funktion (auf Sinusbasis) dar.

Bei den gekürzten Verhältniszahlen einer vollkommenen binären Harmonie unterscheidet Thomson zwei Fälle. Wenn beide Zahlen, wie bei der grossen Sexte, ungerade sind, so nennt er sie eine *ungerade binäre Harmonie* (*odd binary harmony*). Andernfalls ist genau eine der beiden Zahlen gerade, beispielsweise wie bei der kleinen Sexte, dann heisst sie eine *gerade binäre Harmonie* (*even binary harmony*).

Thomson untersucht die Signalverläufe für unvollkommene binäre Harmonien, die sich durch kleine Verstimmungen beider Arten von binären Harmonien ergeben.

Suppose now, one note of a perfect binary harmony to be very slightly sharpened or flattened: so slightly that during a large number of the periods of the perfect harmony, the phase relation in the imperfect harmony experiences but little change. Let the two notes of the imperfect harmony be sustained long enough with perfect uniformity as to pitch and intensity:— the effect will be that of perfect harmony, modified by a slow change of its phase-relation through a cycle; which in the case of an even binary harmony is from coincident maximums gradually to coincident minimums, and thence gradually round again to coincident minimums [maximums dm]; and in the case of an odd binary harmony is from oppositions to coincidences, and round to oppositions again; and so on in cycles. In favorable circumstances, and with careful attention, a variation of the quality of the sound recurring periodically in these successive cycles is distinctly heard, even by an unpractised ear, unless the duration of the cycle be too long or too short to suit its sensibility. It is this variation which is called the “beat” on the imperfect harmony.

The period of the beat – that is to say, the duration of the cycle described above – is most easily found by taking the reciprocal of its frequency, calculated by the following rule:— The frequency of the beat is equal to the error of frequency of one note multiplied by the harmonic number of the other. When in a harmony of three or four notes all are perfect except one, the beats due to the imperfection of the false one are to be reckoned just as if the harmony were binary, according to the following rule:—

For the two or more notes which are in perfect harmony imagine one whose period is the period of their harmony. Take this as if it were one tone of an approximate binary harmony, the false note of the given harmony being the other. Example: Let the frequencies of the three notes be 257, 320, and 384: the common period of the two last-mentioned is $1/64$ of a second, and we have to calculate the beats on two notes whose frequencies are 64 and 257. The harmonic numbers of the harmonies to which these notes approximate are 1 and 4, and the error in frequency of the higher note is 1 per second; hence the beats are at a rate of 1 per second. When there is error in two or more notes of a multiple harmony, two or more sets of beats in periods not commensurable with one another are heard; but the general effect is apt to be too confused to allow any one of the sets distinctly counted. On a multiple harmony with only one note false the beats are in general exceedingly distinct, more so in general than in binary harmonies. [Thomson 1877, 605-606]

Die anschauliche Definition der Schwebungszyklen im ersten Abschnitt des Zitats auf Basis der koinzidenten Elongationsmaxima der Teiltonfunktionen ist höchstens bei einem rationalen Frequenzverhältnis sinnvoll: Falls in diesem Fall die Maxima einmal zusammenfallen, so wiederholt sich dies in periodischen Abständen (nämlich mit der Periodizität des grössten gemeinsamen Teilers). Im Falle einer irrationalen Verstimmung ist man versucht, approximative Koinzidenz mit einer vorgegebenen Fehlertoleranz zu fordern. Dies garantiert aber nicht, dass alle Zyklen auch nur annähernd gleich lang sind.

Die Berechnungsvorschrift für die Zyklenfrequenz im dritten Abschnitt ist für beliebige Frequenzverhältnisse, also auch für irrationale, möglich. Sie baut darauf, dass die

Verstimmung klein gegen die Frequenzen ist. Vertauschen der Rollen führt dann zu näherungsweise gleicher Zyklenfrequenz:

Beispiel

Sei die binäre Harmonie 4 : 7 durch die Frequenzen 400 Hz und 700 Hz realisiert und die zugehörige unvollkommene binäre Harmonie durch 400 Hz und 701 Hz. Dann ergibt die Berechnung mit dem Fehler im von $\delta = 1$ Hz oberen Ton (400 : 700 + δ) die Zyklenfrequenz

$$z = (701 - 700) \cdot 4 \text{ Hz} = 4 \text{ Hz} .$$

Dagegen ergibt sich, wenn man den unteren Ton als verstimmt ansieht und den oberen als exakten Repräsentanten der 7, der Fehler $\varepsilon = 701 \cdot \frac{4}{7} - 400 \text{ Hz} = (400.5714... - 400) \text{ Hz} = 0.5714 \text{ Hz}$ im unteren Ton und somit die Zyklenfrequenz

$$z = (400.5714... - 400) \cdot 7 \text{ Hz} = 7 \cdot 0.5714286... \text{ Hz} = 4.0000002 \text{ Hz} ,$$

die vom oberen Wert nur geringfügig abweicht, weil die Verstimmung des Grundfrequenzverhältnisses sehr gering ist. Es ist dabei zu bemerken, dass die Zyklenfrequenz nicht etwa 1 Hz, was der Periodizität der Harmonie entspricht (ggT(400, 700) = 1), ergibt, sondern in etwa ein ganzzahliges Vielfaches davon, also eine Obertonfrequenz derselben ist.

Die Berechnungsmethode stimmt mit derjenigen von Smith (1749) überein [vgl. Kap. [3.2.5](#)]. Smith macht ja keine Voraussetzung über die Schwingungsform der beiden Töne, und das Kriterium, das Thomsons Definition zugrundeliegt, die Koinzidenz der Maxima, ist mindestens für alle konvexen Schwingungsverläufe mit klaren Extrema (Sinusschwingungen, Dreiecksschwingungen, Nadelimpulsschwingungen, ...) sinnvoll und führt zu den gleichen Ergebnissen bezüglich Modulationszyklen.

Schwebungen höherer Ordnung zwischen Sinustönen

Als Ergebnis seiner Untersuchung hält Thomson die Wahrnehmbarkeit von Schwebungen bei geringfügig verstimmten binären Harmonien zweier Sinustöne fest. Im Unterschied zu Smith (1749) ist klar, dass sich die Aussage auf Sinustöne bezieht. Ihr Auftreten ist aus Sicht der Ohm/Helmholtz'schen Tonauffassung nur für diesen Spezialfall zu beweisen. Für andere Schwingungsformen ergibt sich die gleiche Aussage durch Superposition. Es bieten sich dann aber zusätzliche Erklärungsmöglichkeiten wie Partialtonschwebungen, die bei den verstimmten binären Harmonien aus Sinustönen nicht zur Verfügung stehen und durch Koenigs und Thomsons Versuche gerade ausgeschlossen werden sollen.

It is not generally known how easily beats on approximations to other harmonies than unison are heard, even when the constituent notes are simple tones. Through the kindness of Professor M'Kendrick I have been allowed the means of testing them in every varied combinations, by aid of a series of excellent tuning-forks of Koenig's, each mounted on a wooden box resonator, after the manner of Marloye. [...] The sound proceeding from such a source is essentially a simple tone, or very nearly so. I have tested that in every case the number of beats counted is the smallest that could be according to the preceding theory; for it is to be remarked that the theory only gives the whole period of the phenomenon, but does not answer the question – Does the ear perceive a gradual variation of quality through the whole period, or does it fail to distinguish the difference of quality between two halves of the period, or between three-thirds of it, and so on?

Terzparallelen in 12-temperierter Stimmung auf dem Klavier

Eine Bemerkung Thomsons zu sehr allgemeinen quasi-periodischen Klängen sei hier aus der Sicht von Helmholtz' Dissonanztheorie kurz beleuchtet.

It does not seem easy to explain on any physical or physiological principles the decidedly agreeable effect produced on the ear by a succession of major and minor thirds of pianoforte notes. [Thomson 1877, 608-609]

Klaviertöne haben sehr viele Teiltöne und kleine und grosse Terzen sind nicht rein gestimmt. Die Harmoniebedingung von Thomson ist nicht erfüllt, und der Teiltonreichtum mit zum Teil gegen den Grundton dominierenden Obertönen fügt sich nicht in Helmholtz' Paradigma des musikalisch brauchbaren Klangs mit deutlichen harmonischen Teiltönen höchstens bis zur Ordnung 6. Nach Helmholtz' Rauigkeitsfunktion (für Violintöne) ist der gleichschwebende Tritonus etwas weniger rau als die kleine Terz und ein wenig rauer als die grosse Terz. Wesentlich rauere Harmonien bilden gemäss dieser Auffassung die Sekunden und Septimen der 12-temperierten Stimmung. Helmholtz behilft sich in seiner Erklärung darauf, dass der Klavierklang nur kurz nach dem Anschlag stark sei und die höheren Teiltöne, die zu unangenehmen Teiltenschwebungen Anlass geben könnten, im Vergleich zu den tieferen Teiltönen sehr rasch abklängen [Helmholtz 1863, 315].

6.4. Rudolph Koenig

Schwebungen bei multiplen Frequenzverhältnissen und Stosstöne

Ueber den Zusammenklang zweier Töne, Poggendorfs Annalen, 157, 1876, 177–237

[Koenig 1876]

Ueber den Ursprung der Stöße und Stoßtöne bei harmonischen Intervallen, Poggendorfs Annalen der Physik, XII, 1881, 335–349

[Koenig 1881a]

Die beiden Aufsätze haben Schwebungen in der Nähe von multiplen Grundfrequenzverhältnissen (Stösse) und die Periodiktöne (Stosstöne) zu Harmonien im Sinne von Thomson, das heisst zu in den Schallquellen inexistenten Fourierkomponenten, zum Thema. Die Fragestellung ist für den Gültigkeitsbereich des Ohmschen Gesetzes relevant, die Klangfarbe steht in diesen beiden Aufsätzen aber nicht im Mittelpunkt. Koenig behauptet eine Auswertung der Zeitgestalt, nicht nur bei Einklangsschwebungen, sondern bei beliebigen verstimmten Intervallen von Sinustönen. Die Kriterien dazu bilden einfache Hüllkurvenparameter (koinzidente Maxima mit gleichem oder umgekehrtem Vorzeichen). Da das Vorkommen dieser Koinzidenzen bei gleichem Amplitudenspektrum von den Teiltonphasen abhängig ist, steht eine Sensitivität dafür im Widerspruch zum Ohmschen Gesetz. Im Falle schneller Schwebungen könne die Hüllkurvenperiodizität als Stosston gehört werden. Insbesondere erklären sich dadurch auch die Periodiktöne bei rationalen Grundfrequenzverhältnissen in Fällen die nicht auf Differenztöne zurückführbar sind.

Die folgende Beschreibung bezieht sich auf einen Versuch mit von Koenig selbst verfertigten Stimmgabeln, die durch Resonanzröhren verstärkt werden, und deren Klang von Koenig als weitgehend obertonfrei eingestuft wird. Der Versuch stellt gewissermassen das Pendant zu Helmholtz' Rauigkeitsuntersuchungen für „einfache Töne“ dar:

Wenn man neben dem tiefen, einfachen und starken Tone C (128 v. s.), wie er durch eine große Stimmgabel, welche vor ihrem Resonator tönt, hervorgebracht wird, einen zweiten, in gleicher Weise erzeugten Ton ertönen läßt, den man vom Einklange ausgehend mehr und mehr erhöht, so hört man die sofort nach der Störung des Einklages entstandenen Stöße immer schneller werden. Ist man mit

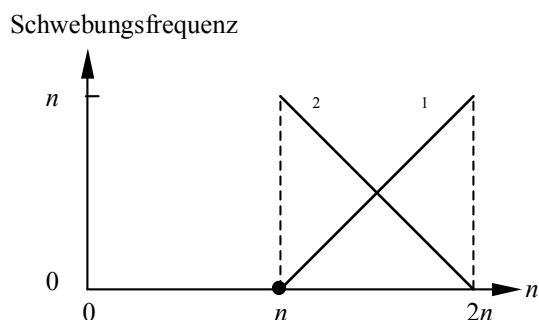
dem höheren Ton bis zu 152 oder 156 v. s., also zwischen D und E gekommen, so gehen die Stöße, welche bis dahin, in der Zahl von 12 bis 14, einzeln hörbar waren, in ein Rollen über, das bis in der Gegend der Quarte bis etwa 171 v. s. (22 St.) immer schneller wird, ohne seinen einfachen Charakter zu verlieren. Ueber die Quarte hinaus entsteht ein verworrenes, aber immer sehr lautes Rasseln, welches über die Quinte fort dauert, bis es in der Gegend der Sexte, bei etwa 212 bis 216 v. s. wieder an Verworrenheit verliert, in ein noch schnelles aber einfaches Rollen übergeht, welches sich zwischen der Sexte und Septime so sehr verlangsamt, daß man bei 238*) und 236 v. s. schon 12 und 10 einzelne Stöße zählen kann, die bei der Septime $H=240$ v. s. zu 8, bei 244 v. s. zu 6 werden und immer geringer an der Zahl, bei der Octave von $c=256$ v. s. zuletzt gänzlich verschwinden. [Koenig 1876, 180–181]

*) statt 238 sollte 232 stehen, dm

Mit v. s. sind „volle Schwingungen“ gemeint, dabei entsprechen aber 128 v. s. pro Sekunde einer Frequenz von 64 Hz. Eine volle Schwingung im Sinne von Koenig umfasst bei Sinusschwingungen die Zeit zwischen zwei Nulldurchgängen. Für eine volle Periode hingegen verwendet er den Begriff der Doppelschwingung. Daraus ergibt sich für die Zahl der Stösse nur die Hälfte der Differenz der Schwingungszahlen in v. s., z.B. $\frac{152-128}{2} = \frac{24}{2} = 12$:

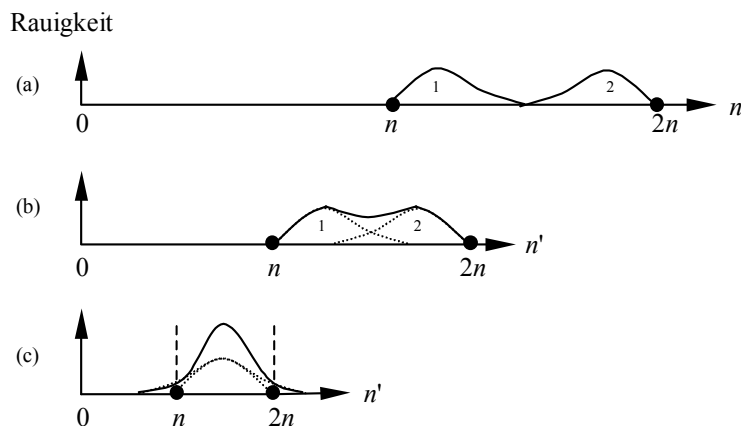
[...] so findet man sofort, daß die Anzahl der in der Nähe des Einklanges einzeln vernehmbaren Stöße gleich der Differenz der Doppelschwingungen der beiden primären Töne ist, und die der Stöße in der Nähe der Octave gleich der Differenz der Doppelschwingungen des höheren der beiden primären Töne und der Octave des tieferen. [Koenig 1876, 181]

Koenig erklärt die Schwebungserscheinung bei der steten Erhöhung des variablen Tons der Frequenz n' vom Einklang des festen Tons n zur Oktave $2n$ als Superposition zweier gegenläufiger Effekte. Ausgehend von der Beobachtung, dass die Zahl der (zählbaren) Schwebungen anfangs zunimmt und in der Nähe der Oktave wieder allmählich abnimmt, um im Fall des periodischen Signals ($n : n' = 2n$) ganz zu verschwinden, behauptet er dass sich für jeden Wert der variablen Frequenz n' zwei Stossvorgänge überlagern, deren Frequenzen die Differenz zu n und zu $2n$ sind, also $n' - n$ und $2n - n'$. Während bei zunehmender Frequenz die Deutlichkeit der „unteren Stösse“ allmählich abnehme, nehme diejenige der „oberen Stösse“ allmählich zu.



Die Situation ist also von ihrer Wirkung vergleichbar mit derjenigen, bei der nicht zwei sondern drei Töne n , n' und $2n$ beteiligt sind, die paarweise Stösse bilden: Für das Paar $(n, 2n)$ ist die Differenz der Frequenzen gleich n , und da die Superposition der beiden Töne ebenfalls streng periodisch zur Frequenz n ist, werden allfällige Interaktionen vernachlässigt, also bleibt die Zusammenwirkung der beiden Schwebungspaare (n, n') und $(n', 2n)$. Nach Koenigs Angaben ist aber gar kein Sinuston der Frequenz $2n$ vorhanden, mit dem der variable Ton n' in Interaktion treten könnte. Es ist deshalb nicht erstaunlich, dass in der Erklärung des Phänomens von Helmholtz und Hermann die Obertonfreiheit des tieferen Tons bezweifelt wird. Falls die Töne obertonfrei sind, liegt nämlich eine Verletzung des Ohmschen Gesetzes vor, denn Schwebungen mit nicht vorhandenen Tönen, können damit nicht erklärt werden. Andernfalls fügt sich die Beschreibung gut in Helmholtz' Schwebungstheorie ein. Die

Helmholtzsche Rauigkeitstheorie übertragen auf die Situation dreier Sinustöne ergibt qualitativ folgendes Bild:



Rauigkeitsfunktionen für drei Sinustöne gleicher Amplitude und den Frequenzen n , n' , $2n$. Je nach Grösse der tieferen Frequenz rücken die beiden Buckel näher zusammen. Situation (a) ergibt eine schwebungsfreie Quinte. Bei (b) und (c) sind zur Ermittlung der Gesamtrauigkeit die beiden Rauigkeiten im Überlappungsbereich zu addieren. Während im zweiten Fall, die Rauigkeit im Bereich der Quinte etwas zurückgeht, so wird sie im dritten dort maximal, da die Rauigkeitsmaxima übereinander liegen. Auch Einklang und Oktave sind in diesem Fall nicht völlig ohne Rauigkeit. Nach Helmholtz 1863 liegt das Rauigkeitsmaxima unabhängig von der Lage im Frequenzraum bei einer Frequenzdifferenz von etwa 33 Hz. Deshalb ergibt sich bei der Transposition der drei Töne die Rauigkeitsfunktion *nicht* durch zentrische Streckung. Beispiel (c) erklärt damit etwa Koenigs Versuch mit $n = 128$ v.s. (= 64 Hz) unter der Annahme, dass ein Ton der Frequenz $2n$ auf der Basilarmembran vorhanden ist.

Nur bei ganz tiefen Frequenzen ($n = 40$ Hz) konnte Koenig die beiden überlagerten Effekte zugleich deutlich hören. In diesem Bereich liegen die Töne der Oktave aber innerhalb eines kritischen Bandes, und eine saubere Trennung der Erregungen auf der Basilarmembran ist nicht gewährleistet. Dies erklärt aber nicht, dass die Schwebungen in der Nähe der Oktave erneut zählbar werden. Bei den notwendigerweise hohen Amplituden eines deutlichen Sinustons dieser Frequenz sind zudem subjektive Obertöne nicht auszuschliessen, die sich aus der deformierten Gestalt der auf die Basilarmembran übertragenen Sinusschwingung ergeben. Die Grundfrequenz des höheren bildet dann mit dem ersten Oberton des tieferen ein Schwebungspaar.

Zwischen Oktave (64 Hz : 128 Hz) und Duodezim (64 Hz : 192 Hz) lasse sich ein analoges Phänomen beobachten:

Erweitert man das Intervall der Octave 128 : 256 v. s. [...] so entstehen sofort wieder die einzelnen hörbaren Stöße [...], welche in ein einfaches Rollen übergehen, das sich etwa bei 296 v. s. in ein verworrenes Rasseln verwandelt. Dieses Rasseln wird schnell schwächer und zwischen e und f [...] läßt der Zusammenklang der beiden Töne eine bloße Rauigkeit vernehmen, aus der [...] ein wieder deutlicheres, schnelles Rollen hervortritt, welches sich bald verlangsamt um bei 360 bis 364 v. s. 12 bis 10 Stöße einzeln vernehmen zu laßen, die denn [...] bei g = 384 v. s. (1 : 3) verschwinden. [Koenig 1876, 183]

In der Nähe multipler Verhältnisse sind gemäss Koenig hör- und zählbare Schwebungen sogar bis zur dreifachen Oktave zu beobachten. In diesem letzten Fall liegen die Töne in verschiedenen kritischen Bändern und eine direkte Interaktion der Erregungsstellen ist auszuschliessen ($8 \cdot 64 \text{ Hz} - 64 \text{ Hz} = 448 \text{ Hz}$). Eine Erklärung mittels Differenztöne scheint Koenig unwahrscheinlich:

Man hat bis jetzt angenommen, daß Stöße nur durch zwei dem Einklange nahe Töne direct erzeugt werden könnten und daß die Stöße aller weiteren Intervalle mit Hülfe resultirender Töne erzeugt würden. Hiernach müssten also bei den Intervallen C : c" - 2 v. d., welches, wie wir gesehen haben, deutlich zwei Stöße hören läßt, diese Stöße in folgender Weise entstanden seyn: [...][Koenig 1876, 186]

Die Erklärung mittels Kombinationstöne sei deshalb fragwürdig, da sie Differenztöne hoher Ordnung erfordere: $8 - 1 = 7$, $7 - 1 = 6$, ..., $2 - 1 = 1$, erst der letzte Kombinationston 7. Ordnung ergäbe mit C die gewünschte Anzahl Schwebungen [Koenig 1876, 186].

Von allen diesen Zwischentönen habe ich keine Spur entdecken können und außerdem hat der Ton c" - 2 v. d. eine verhältnißmäßig so geringe Intensität, wenn seine Stöße mit dem großen C am deutlichsten hörbar sind, daß es geradezu unmöglich scheint, er solle irgend welchen, auch nur im Geringsten wirksamen Combinationston in Verbindung mit anderen Tönen hervorbringen können, und noch unerklärlicher möchte es seyn, daß er der Ursprung einer ganzen Reihe von Combinationstönen würde. [Koenig 1876, 186]

Die vollständige Reihe der Kombinationstöne bis zur siebten Ordnung ist allerdings zur Erklärung nicht erforderlich: $(8-\delta)-1 = 7-\delta$; $8-(7-\delta) = 1 + \delta$, d. h. der Differenzton zwischen dem gewöhnlichen Differenzton und dem höheren Ton ergibt bereits die richtige Anzahl Schwebungen. Die Beobachtung Koenigs, daß der höhere Ton im Verhältnis viel schwächer sein müsse, damit das Phänomen wahrnehmbar werde, spricht gegen die Erklärung mittels Kombinationstönen, da solche nur bei grossen Intensitäten der Primärtöne auftreten. Die Erklärung Hermanns (1896), dass es sich ausschliesslich um Schwebungen mit Obertönen handle, trägt den Intensitätsverhältnissen Rechnung, allerdings ist fraglich, ob eine Stimmgabel vor einem Resonator stationäre hörbare Obertöne bis zum siebten erzeugt, da in der Schnittmenge der Eigentöne nur eine einzige Sinuskomponente liegen sollte.

Es ist daher weit natürlicher, die Stöße der harmonischen Intervalle wie die des Einklages, direct aus der Composition der Tonwelle abzuleiten und anzunehmen, daß sie aus den periodisch abwechselnden Coincidenzen der gleichartigen Maxima der Töne n und n', und der Maxima, welche entgegengesetzte Zeichen haben, entstehen. [Koenig 1876, 186]

Das Gehör wäre demnach in der Lage, die Hüllkurve der Zeitfunktion auszuwerten und nicht bloss, die Fourierkomponenten zu ermitteln. Summe und Differenz der Maxima bilden dabei die Schwankungsbreite der Hüllkurve. Die Erklärung deckt sich mit derjenigen von Mathes und Miller 1947. Die großen Intervalle sind für eine Ortstheorie besonders delikate, da die Töne (1 : 8) weit außerhalb der kritischen Bandbreite liegen. Innerhalb der kritischen Bandbreite sind Phaseneffekte auch mit einer Ortstheorie erklärbar.

Eine Eigenthümlichkeit der Stöße harmonischer Intervalle besteht noch darin, daß die beiden primären Töne abwechselnd hervortreten. [...] Auch diese Erscheinungen dürften sich leichter aus den Figuren der Stöße dieser Intervalle erklären lassen, als aus der Annahme resultirender Zwischentöne, welche man nicht hören kann. [Koenig 1876, 188]

Hermann dagegen erklärt das periodische Hervortreten des oberen Tons aus der Schwebung mit dem betreffenden Teilton [vgl. Kap. 6.5].

Bei den Intervallen mit dem Grundtone c", sind die unteren und oberen Stöße als solche nur noch ganz in der Nähe des Einklages und der harmonischen Intervalle zu vernehmen, sie gehen wegen ihrer großen Zahl in Töne über, welche für verschiedene Intervalle in folgender Weise gehört werden: [...] [Koenig 1876, 191]

Dies könnte als Beschreibung eines Residuums aus nur zwei unaufgelösten Sinustönen verstanden werden. Die Stosstöne werden von Koenig ja nicht als Differenztöne interpretiert.

Falls Kombinationstöne auszuschliessen sind, so gibt es, unabhängig von der Schwingungsform der beiden Töne, jedenfalls keine Sinuskomponente zum gehörten Stosston. Koenig erklärt sich sein Vorkommen aus der Hüllkurvenperiodizität.

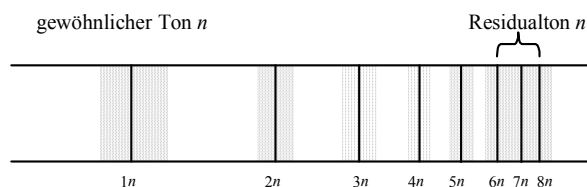
Z. B. die Töne des Verhältnisses $4 : 9$, $c^{III} : d^{IV}$, lassen ganz laut den Stoßton $m=1=c^I$, und keine Spur des Tones $9-4=5=e^{III}$ hören. [Koenig 1876, 194]

Die gehörte Tonhöhe des Stosstons unterscheidet sich von derjenigen des ersten Differenztons. Zur Unterscheidung der beiden Effekte sind nur nicht superpartikuläre Intervallproportionen geeignet, da bei $n : (n+1)$ Differenz- und Stosston die gleiche Tonhöhe haben. Im Fall $4 : 9$ ergibt die Oktave 8 des tieferen Tons, falls sie als objektiver oder subjektiver Teilton vorhanden ist, mit dem oberen Ton ebenfalls den Differenzton 1 und hat die gleiche Tonhöhe wie der Stosston.

Stosstöne heissen bei Ohm 1839 unbedingte Kombinationstöne und in moderner Terminologie Periodiktöne oder Residualtöne.

Wir haben oben gesehen, daß [...] in der Gegend der Quinte $C : G$, aus der Coexistenz dieser beiden Arten Stöße ein starkes, verworrenes Gerassel entstand, und daß endlich in den hohen Octaven, ebenfalls bei den Intervallen $n : hn + m$, wenn m nahe $n/2$ war, beide Stoßtöne m und m' zugleich beobachtet werden konnten. Diese beiden nebeneinander bestehenden Stoßtöne verhalten sich nun wieder ebenso miteinander, als es zwei gleiche, primäre Töne von derselben Intensität thun würden, d. h. sind sie dem Einklang nahe, so lassen sie starke Stöße hören; bilden sie nahezu das Intervall der Octave, so geben sie ebenfalls Stöße, welche jedoch schwächer sind, und in gleicher Weise kann auch noch die gestörte Duodeceime Stöße hören lassen. [Koenig 1876, 195]

Diese „Beobachtungen“ kehren in neuerer psychoakustischer Literatur nicht wieder, und klingen eher unwahrscheinlich. Da nach heutiger Auffassung, die Tonempfindung eines Residuums an der Stelle der verursachenden Partialtönen entsteht, ohne dass dabei dort eine zugehörige reale, interaktionsfähige Sinuskomponente existiert, können sie untereinander und mit gewöhnlichen Tönen keine Schwebungen bilden. Diese fehlende Interaktionsfähigkeit erlaubt es gerade, sie von den real vorhandenen Kombinationstönen zu unterscheiden.



Entstehungsort der Residualtöne auf der Basilarmembran (schematisch). Die wegen ihres kleinen Intervalls nicht unabhängig von einander verarbeiteten drei Teiltöne $6n$, $7n$ und $8n$ verursachen in diesem Bereich einen Ton der Frequenz n , die der Periodizität des Teilklangs aus diesen drei Tönen entspricht. Residualtöne bilden mit gewöhnlichen Tönen der gleichen oder ähnlicher Frequenz keine hörbaren Interferenzerscheinungen: weder Auslöschung noch Verstärkung noch Schwebungen.

Falls Stosstöne mit gewöhnlichen Tönen in Schwebung treten könnten, wären sie entweder, entgegen Koenigs ursprünglichen Intention, als nicht-linearer Effekt bei der Schallübertragung zwischen Trommelfell und Basilarmembran, das heisst als Kombinationstöne, angesehen werden, oder aber Stosstöne und gewöhnliche Töne werden bei der höheren Verarbeitung als gleichwertig behandelt.

Helmholtz hat ferner bemerkt, das sich ein schwebender Zusammenklang mit einem Ton von periodisch wechselnder Intensität vergleichen läßt, und daß 'Schwebungen und Intermittenzen sowohl unter sich gleich sind, als auch bei einer gewissen Anzahl die Art Geräusche hervorbringen, welche wir Knarren nennen' (Tonempfind. III, 266). Würden nun Intermittenzen immer nur Knarren erzeugen, so könnte

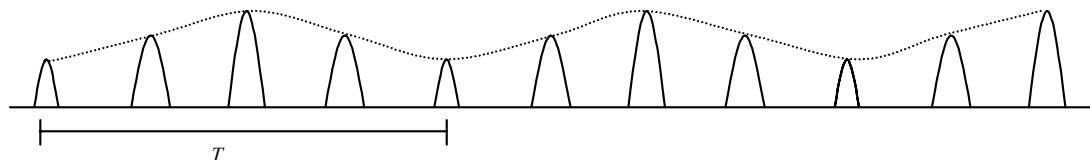
allerdings die große Aehnlichkeit, welche sie bei nicht zu großer Anzahl mit den Schwebungen zeigen, vermuthen lassen, daß auch diese letzteren immer nur ein Knarren hervorzubringen im Stande seyn dürften, es gehen aber auch Intermittenzen, ganz ebenso wie primäre Impulse, bei genügender Anzahl und hinreichender Intensität in einen Ton über.

Es läßt sich dies leicht vermittelst einer Scheibe nachweisen, welche einen Kreis von großen Löchern trägt und die man vor einer Stimmgabel rotiren läßt. [...] Natürlich wird nicht jeder beliebige Ton bei jeder beliebigen Anzahl Unterbrechungen einen Ton hervorrufen können, welcher dieser Unterbrechungszahl entspricht, sondern es wird ausser der genügenden Stärke und der hinreichenden Anzahl der Intermittenzen auch noch nöthig seyn, daß die Lufterschütterungen, welche durch die Oeffnungen der Scheibe hindurchdringen, einander gleich seyn, und dieses sind sie z. B. nie, wenn die Zahl der Unterbrechungen größer ist als die der Doppelschwingungen des Tones. [...] Am günstigsten aber für seine Hörbarkeit scheint der Fall zu seyn, in welchem immer eine ganze Reihe von Tonwellen durch jede Oeffnung dringen kann, d. h. wenn also die Schwingungszahl des Tones sehr beträchtlich größer ist als die Zahl der Intermittenzen. [Koenig 1876, 228-229]

Die sich aus Königs Beschreibung ergebenden Zeitsignale sind in Barkowsky [1996, 235] abgebildet. Barkowsky modelliert die Zeitfunktion als periodische Folge von Oszillationen mit jeweils glockenförmiger Trägerfunktion. Ähnliche Signale wurden später von Mathes und Miller [1947, 787] untersucht. Die Fourieranalyse zeigt, dass sich derartige Signale aus einer Folge benachbarter Fourierkomponenten hoher Ordnungszahl erzeugen lassen [Barkowsky 1996, 236-237]. Es handelt sich also um eine klassische Situation für Residualtöne.

Im Vorigen wurde ein Ton von an sich beständig gleicher Intensität auf mechanischem Weg nur intermittierend zum Ohre gelassen; der Uebergang periodischer Schwingungsmaxima in einen Ton läßt sich jedoch auch bei Tönen beobachten, welche selbst eine periodisch wechselnde Intensität besitzen. Ich habe zu diesem Zwecke Sirenscheiben construirt mit Kreisen, auf denen sich die Löcher in gleichen Abständen befinden, aber periodisch größer und kleiner werden, so daß eine Reihe isochroner Impulse von periodisch wechselnder Intensität erzeugt wird, wenn man sie durch Röhren von dem Durchmesser der größten Löcher anbläst. [Koenig 1876, 230]

Daraus ergibt sich folgende Art von Zeitfunktionen:



Folge periodischer Impulse mit modulierender Amplitude. Die Periodizität in der Hüllkurve führt gemäss Koenig zu einem hörbaren Stosston. Als Basisfrequenz der Fourieranalyse muss die Frequenz $1/T$ genommen werden. Es ist in diesem Fall nicht a priori klar ob im Fourierspektrum eine zugehörige Frequenzkomponente vorkommt oder nicht.

Die Deutung der Stösse und Stosstöne mit Hilfe von Kombinationstönen wird gemäss Koenig 1881a von der Allgemeinheit als unhaltbar akzeptiert. Hingegen hat Helmholtz 1877 neu die Stösse als Schwebungen zwischen dem höheren Primärton und Obertönen des tieferen zu erklären versucht [vgl. Helmholtz 1896, 263]. Diese Obertöne könnten allenfalls auch erst im Ohr entstehen.

Koenig verteidigt seine Stimmgabeln aufgrund ihrer Geometrie und seine Einrichtung *Stimmgabel plus Resonator* als weitgehend obertonfrei.

Die in meiner Abhandlung angegebenen Maasse meiner Stimmgabeln zeigen nun, dass dieselben [...] in den besten Verhältnissen waren schon an und für sich einfache Töne zu erzeugen, selbst wenn sie ganz allein vibrirten, ich habe sie jedoch nicht einmal in dieser Weise angewendet, sondern in Verbindung mit passenden Resonanzröhren, und unter solchen Umständen lässt sich z. B. bei der Gabel c(Ut₂); mit 29 mm dicken Zinken, auch nicht die geringste Spur der Octave oder eines höheren Obertones vermittelst der Resonatoren in der aus der Oeffnung der Resonanzröhre zwischen der Armen der Stimmgabel hervorbrechenden Tonmasse erkennen. Auch muss ich bemerken, dass, wenn zwei solche

Gabeln langsame Stösse des Unisonos ausführten, man in den Augenblicken der Interferenz den Ton vollständig verschwinden hörte, statt dass er in die Octave hätte übergehen müssen, wenn diese im Klange der Grundtöne mit wahrnehmbarer Intensität enthalten gewesen wäre. [Koenig 1881a, 339]

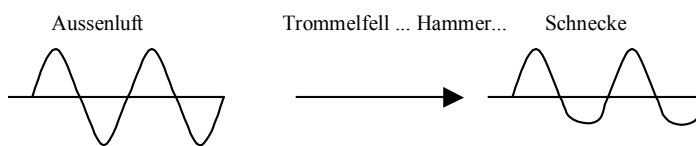
Das letzte indirekte Argument ist nicht stichhaltig. Bei den von Young behandelten Schwebungen zwischen Dreiecksschwingungen verstärken und löschen, sich die beiden Töne in gleicher Weise alternierend aus wie Sinusschwingungen. Dreiecksschwingungen sind aber nicht obertonfrei. Sie bilden also ein Gegenbeispiel zu Koenigs Behauptung.

Bezüglich der Ermittlung subjektiver Obertöne gibt Koenig eine interessante Methode unter Verwendung von Hilfstönen an:

Man weiss, dass die Deutlichkeit der Stösse beim Einklang von der relativen Intensität der beiden Töne abhängt, und am grössten wird, wenn diese bei beiden gleich ist, es ist also immer sehr leicht, wenn man Stösse zweier Unisonotöne hört, von denen man nur den einen direct einzeln beobachten kann, auch die Intensität des anderen mit einem Hilfstone zu ermitteln, dessen Stärke man so lange ändert, bis die Stösse wieder mit dem ersten gleich deutlich hervortreten.

Hört man nun die Stösse, z. B. einer alterirten Octave, und sucht nach Dämpfung des Grundtones, ganz abgesehen von der Tonalität der vorher gehörten Stösse, nur ihrer Deutlichkeit mit dem Hilfstone, der auf die Octave dieses Grundtones stimmt, herzustellen, so überzeugt man sich sofort, dass man genöthigt ist ihm eine so bedeutende Intensität zu geben, dass wenn derselbe Ton mit gleicher Stärke im Ohre von dem tieferen primären Tone erzeugt würde, man ihn, sobald dieser allein tönt, in einer Weise hören müsste, wie man ihn durchaus nicht zu vernehmen im Stande ist. [Koenig 1881a, 340]

Die wahrgenommenen Schwebungen sind also nach Koenigs Argumentation viel stärker als diejenigen, die mit subjektiven Obertönen auftreten könnten.



Subjektive Obertöne als Folge der verzerrten mechanischen Übertragung eines Sinustons zwischen Trommelfell und Schnecke. Das verzerrte Signal ist noch immer periodisch zur gleichen Frequenz. Da aber die Schwingungsform von der Sinusgestalt abweicht enthält das übertragene Signal im Fourierspektrum Obertöne.

Reguliert man ferner die Intensität der beiden Töne eines alterierten Intervalls in der Weise, dass die Stösse am deutlichsten hervortreten, so müssten, wenn sie durch den höheren primären Ton und einen im Ohr erzeugten harmonischen Oberton des tieferen, also durch zwei Töne im Einklang gebildet wären, diese Stösse auch auf diesen Oberton gehört werden, man nimmt aber gerade das Gegentheil wahr, d. h. dass der Grundton seine Intensität periodisch ändert und dabei nur in den Momenten grösster Schwächung den höheren Ton hervortreten lässt, wie ich früher beschrieben. [Koenig 1881a, 341]

Im Gegensatz dazu fänden Schwebungen mit Kombinationstönen auf der richtigen Tonhöhe statt.

Koenig gesteht allerdings ein, dass die von ihm verwendeten Intensitäten allenfalls Anlass für subjektive Obertöne geben könnten [Koenig 1881a, 341].

Als Alternative zu den Stimmgabeln versuchte Koenig Sinustöne auch auf anderem Weg mit Hilfe der von ihm erfundenen Wellensirene [vgl. nächster Abschnitt] herzustellen. Er führte damit dieselben Experimente zu Stössen und Stosstönen durch. Durch Schrägstellen der Anblaspalte bei der Wellensirene könne aus einem einfachen Sinuston ein stark obertonhaltiger Klang erzeugt werden.

Wenn nun bei den oben beschriebenen Experimenten die beiden Pendelbewegungen nicht ganz einfach gewesen sein sollten und die Stosstöne mit Hülfe der sie begleitenden schwachen harmonischen Töne entstanden wären, so müssten diese Stosstöne auch an Intensität gewinnen, wenn man die unmerklich schwachen Obertöne plötzlich in starke verwandelte. Beobachtet man jedoch die Stärke eines Stosstons, während die Curve durch eine normale Spalte angeblasen wird, und gibt dann dieser Windspalte plötzlich eine schräge Stellung, so vergrößert sich die Intensität des Stosstons in keiner Weise, sondern wird im Gegentheil etwas geringer. [Koenig 1881a, 349]

Bemerkungen über die Klangfarbe

Bemerkungen über die Klangfarbe, Annalen der Physik und Chemie, 14, 1881, 369–393
[Koenig 1881b]

Der Aufsatz zur Klangfarbe [Koenig 1881b] ist in das einleitende Kapitel „Harmonische Töne und Theiltöne“ und in „Einfluss der Phasendifferenz der harmonischen Töne auf die Klangfarbe“ eingeteilt, hat also primär die Phasenfrage zum Thema. Den Begriff des *Teiltöns* bezieht Koenig auf Klänge mit inharmonischem Spektrum, das heisst auf Fälle, bei denen die Eigenfrequenzen eines klingenden Körpers nicht ganzzahlige Vielfache einer Grundfrequenz sind. Der Begriff der „harmonischen Töne“ (engl. *harmonics*) bezeichnet diejenigen Sinustöne, die sich aus der Fourieranalyse eines streng periodischen (nicht sinusförmigen) Klanges ergeben. Im Unterschied zum heute üblichen Sprachgebrauch, bei dem der Begriff des Teiltöns, die harmonischen Teiltöne umfasst, schliessen sich die beiden Begriffe gegenseitig aus.

So heisst es bei Koenig:

Von der absoluten Reinheit der harmonischen Intervalle der Töne, welche die Klänge solcher Körper bilden, die keine Theiltöne hervorbringen, wie z. B. der durchschlagenden Zungen, überzeugt man sich, indem man zwei Unisonogrunderlöne um eine Schwebung verstimmt und dann die Schwebungen der Obertöne zählt; man constatirt dann, dass die letzteren genau im Verhältniss der Ordnungszahlen dieser Töne an Frequenz zunehmen [...] [Koenig 1881b, 369-370]

In unserer Terminologie bilden die durchschlagende Zungen harmonische Teiltöne aus. Andererseits heisst es auch:

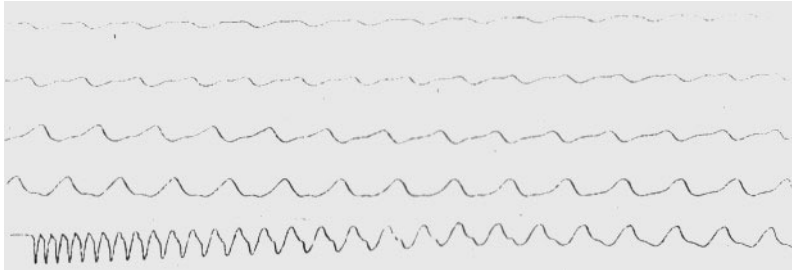
Theiltöne, welche theoretisch mit harmonischen Tönen zusammenfallen, findet man zuerst bei Orgelpfeifen; aber sowohl bei offenen wie bei gedackten Pfeifen weichen sie beträchtlich von den harmonischen Schwingungszahlen ab, indem sie eine mit den Ordnungszahlen der Obertöne progressiv zunehmende Erhöhung über die Töne der harmonischen Reihe erkennen lassen. [Koenig 1881b, 370]

Ähnliches gelte auch für Saiten, bei Darmsaiten ausgeprägter als bei Metallsaiten [Koenig 1881b, 370-373].

Wen aber, wie alle diese Tonschriften [= Visualisierungen des Signalverlaufs dm] zeigen, bei Saiten, welche die Bedingungen einer idealen Saite nicht genügend erfüllen, das gleichzeitige Auftreten des Grundtones und eines oder mehrerer Theiltöne Schwingungsbewegungen hervorruft, welche sich beständig transformieren, so geht hieraus auch hervor, dass, wenn die aufeinander folgenden Schwingungen solcher Saiten keine Veränderungen zeigen, aber ihre Formen von der Sinuscurve abweichen, diese Abweichung nicht eine Folge der Coexistenz einer Reihe von | Theiltönen sein kann, sondern dass die Saite in solchem Falle in ihrer ganzen Länge ohne Unterabtheilungen schwingt. [Koenig 1881b, 372-373]

Die Schwingungsform eines Klanges mit inharmonischen Teiltönen ist also einer steten Veränderung unterworfen. Dennoch gehört zu ihnen ein zeitlich konstantes diskretes Spektrum (Nadelspektrum). Solche Zeitfunktionen heissen fast-periodisch oder

quasiperiodisch. Das Theorem von Fourier, wie es im 19. Jahrhundert angewendet wird, deckt diese allgemeinere Situation nicht ab, das heisst bei Kenntnis des Funktionsverlaufs können damit die Teiltöne und ihre Amplituden nicht bestimmt werden. Die mathematische Theorie der fast-periodischen Funktionen wird von H. Bohr (1887-1951) im Jahre 1923 begründet [vgl. Myschkis 1981, 519-520].



Modulierende Zeitfunktion zu einem inharmonischen Klang, einer versetzten Oktave aus 2 Teiltönen gleicher Amplitude [Quelle: Koenig 1881b, 372 (invertierte Farbwiedergabe)]. [vgl. auch Anhang [C]].

Bei einem schwingenden Körper, der in einem einzigen Eigenklang schwingt, sei die Abweichung der Schwingungsform von der Sinusform dabei im Allgemeinen um so stärker, je grösser die Amplitude im Verhältnis zu seinem Querschnitt stehe.

Daraus ergibt sich, dass nach den Vorstellungen von Koenig bei einem Körper mit den inharmonisch verteilten Eigentönen t_1, \dots, t_n folgende Menge an Frequenzen möglich ist:

$$\begin{array}{cccccc} t_1 & 2 \cdot t_1 & 3 \cdot t_1 & 4 \cdot t_1 & 5 \cdot t_1 & \dots \\ t_2 & 2 \cdot t_2 & 3 \cdot t_2 & 4 \cdot t_2 & 5 \cdot t_2 & \dots \\ t_3 & 2 \cdot t_3 & 3 \cdot t_3 & 4 \cdot t_3 & 5 \cdot t_3 & \dots \\ t_4 & 2 \cdot t_4 & 3 \cdot t_4 & 4 \cdot t_4 & 5 \cdot t_4 & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ t_n & 2 \cdot t_n & 3 \cdot t_n & 4 \cdot t_n & 5 \cdot t_n & \dots \end{array}$$

Im Falle harmonischer Eigenfrequenzen, falls also

$$t_i = n \cdot t_1, \quad i = 1 \dots n,$$

bleiben als Frequenzvorrat nur die ganzzahligen Vielfachen der Grundfrequenz t_1 , nämlich

$$i \cdot t_1, \quad i \in \mathbb{N},$$

der Fall der idealen Saite mit periodischem Schalldruckverlauf. Andernfalls, wenn

$$t_i \neq n \cdot t_1 \text{ für mindestens ein } i \leq n,$$

sind beliebig viele Schwebungspaare von Sinustönen möglich, denn es ist ja nicht ausgeschlossen, dass die Saite gleichzeitig mehrere Eigentöne gibt, die je ihre eigenen harmonischen Obertöne haben.

Verlangt man von den Tönen, die einer diskreten, additiven Synthese zugrundeliegen, nicht zwingend sinusförmige Gestalt, geht die eindeutige Bestimmtheit der Koeffizientenfolgen und der Menge der Teiltonperiodizitäten verloren.

Koenigs Begriff der Teiltöne läuft auf die *erweiterte Definition des Tons* in Sinne von Seebeck hinaus. In terminologischer Verallgemeinerung von Koch/Helmholtz wäre die Bezeichnung Teilklänge zu bevorzugen. Wobei von Teilklangen nur zu fordern ist, dass sie periodisch sind. Sie bestehen also in der Regel selbst aus Teiltönen, deren Frequenzen aber harmonisch zu einander stehen. Ein beliebiger Klang mit stationärem diskreten Fourierspektrum kann als Überlagerung von (periodischen) Teilklangen interpretiert werden.

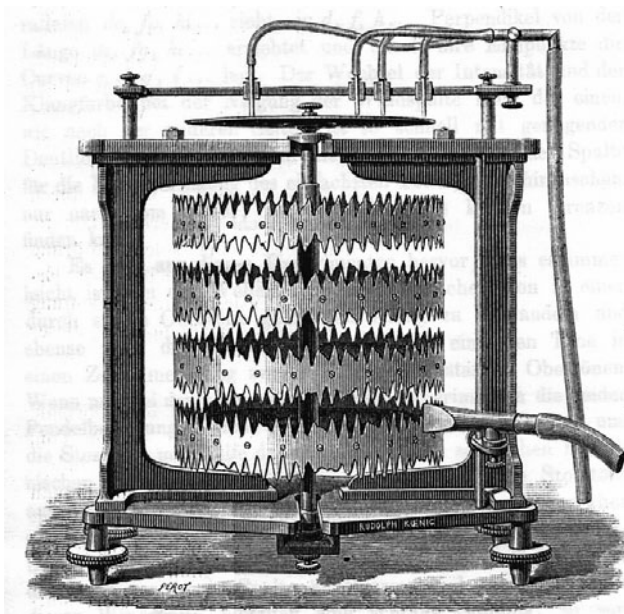
Die Eindeutigkeit der Zerlegung kann erzwungen werden, wenn eine minimale Zahl von Teilklangkomponenten gefordert wird. Die einzelnen Teilklangkomponenten haben dann in der Regel nicht die gleiche Schwingungsform. Der Zusammenklang zweier harmonischer Klänge im Abstand einer reinen Quinte besteht in minimaler Darstellung aus einem einzigen Teilklang, die Grundfrequenz ist dabei die Unteroktave des tieferen Klangs. Überlagert man dagegen 12-temperierte Quinten, besteht die minimale Darstellung aus zwei Teilklangen. Die minimale Zerlegung eines Zusammenklangs in Teilklänge reflektiert also im Allgemeinen nicht die gehörmässige Zerlegung in die Töne eines musikalischen Intervalles.

Zur Klärung der Phasenfrage entwickelte Rudolph Koenig zwei Arten von Sirenen. Sie dienen dazu Schalldruckverläufe mit vordefinierter Schwingungsform zu generieren und sollen die Mängel in Helmholtz' Stimmgabelsynthesizer beseitigen. Die Experimente mit diesen Apparaten sollen die Grenzen des Ohmschen Gesetzes aufzeigen:

Eine bemerkenswerte Aussage Koenigs betrifft Klangpaare mit zur Zeitachse spiegelsymmetrischem Schalldruckverlauf: Solche sind nicht immer ununterscheidbar. Das heisst Verdichtungen und Verdünnungen sind nicht austauschbar. Koenig bezieht seine Aussage auf normale Lautstärken.

Bei der Erklärung der subjektiven Obertöne von lauten Sinustönen wird in der Regel geltend gemacht, dass die mechanische Übertragung zwischen Trommelfell und Cochlea asymmetrisch, das heisst nicht verzerrungsfrei arbeitet. Ein Sinuston der Aussenluft erleidet bei dieser Übertragung eine Veränderung der Schwingungsform bei der Verdickung und Verdünnung nicht mehr punktsymmetrisch verlaufen, so dass sich im Fourierspektrum Obertöne ausbilden [s. o.].

Beim ersten Typ von Koenigs „Wellensirenen“ wird der zu erzeugende Luftdruckverlauf in eine Schablone geschnitten, welche vor einer orthogonalen Düse rotiert. Wir nennen sie im folgenden die *Schablonensirene*, da sie zum Ziel hat, denn Kurvenverlauf auf dem Blechstreifen eins-zu-eins, isomorph, auf die Luft zu übertragen.

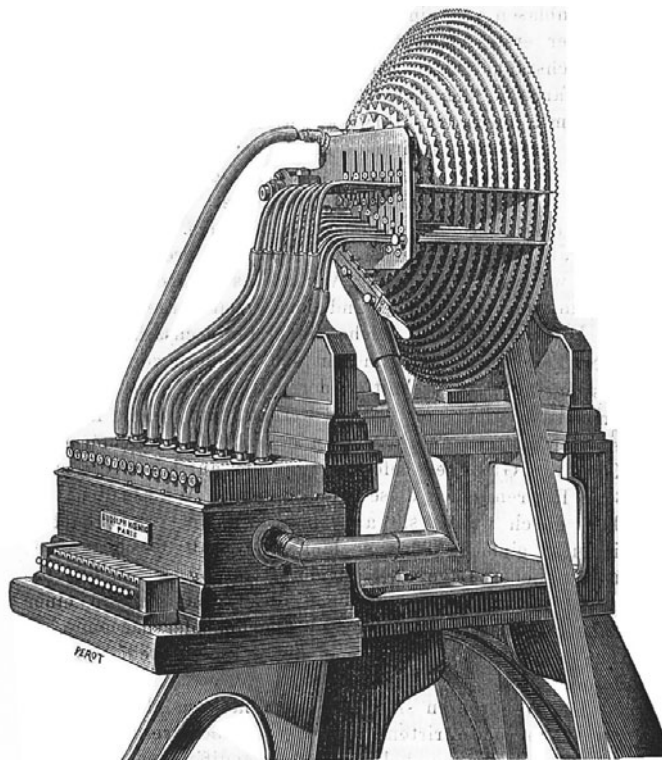


Wellensirene ("Schablonensirene"). Die gewünschte Schwingungsform ist auf Blechstreifen ausgeschnitten. Die Anblasvorrichtung besteht aus einem vertikalen, schmalen Schlitz. Je nach vertikaler Position des jeweils abgetasteten Randpunktes auf dem Blechstreifen wird bei konstanter Luftzufuhr mehr oder weniger Luft durchgelassen. Die Gestalt des Randes steuert also den Luftdruckverlauf. Durch vertikale Verschiebung der Düse kann die Schwingungsform in kurzer Zeit

umgestellt werden. Die gezeichnete Sirene erlaubt acht verschiedene Schwingungsformen [Quelle: Koenig 1881a, 347]

Die Schablonensirene wird von Hermann 1896 kritisiert: Die Interferenz mit dem an der Zeitachse „gespiegelten“ Signal führe nämlich nicht zur erwarteten Auslöschung. Zwei bezüglich Zeitachse spiegelsymmetrische, gleichzeitig angeblasene Schablonen müssten sich bei ihrer Superposition zu 0 addieren, das heisst es dürfte überhaupt nichts zu hören sein. Da dies gemäss Hermann nicht der Fall ist, könne der Luftdruckverlauf nicht genau den ausgeschnittenen Kurvenformen entsprechen.

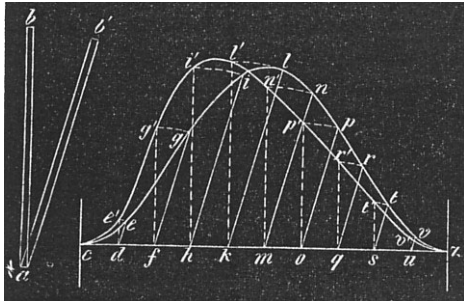
Koenig konstruiert einen weiteren Apparat zur Klärung der Phasenfrage. Es handelt sich dabei um eine Kombination mehrerer Wellensirenen zu sinusförmigen Schwingungen. Der Apparat erlaubt die Herstellung von Klängen aus 16 harmonischen Teiltönen, die in Amplitude und Phase beliebig verändert werden können. Ebenfalls kann die Frequenz der Teiltöne (durch Veränderung der Rotationsgeschwindigkeit einzelner Ringe) in geringem Masse beeinflusst werden, so dass auch das Studium von Klängen mit inharmonischen Teiltönen möglich ist. Er wird im Folgenden *Sirenen-synthesizer* genannt.



Sirenen-synthesizer für 16 Partialtöne zur Klärung der Phasenfrage. Die sinusförmigen Schablonen der einzelnen Teiltöne, sind kegelförmig angeordnet und werden über eine gemeinsame Windlade via Gummischläuche durch schmale Spalten angesteuert. Durch konzentrische Veränderung der Anblasstelle können die Phasen ohne Beeinflussung der Amplitude individuell eingestellt werden. Durch exzentrische Schrägstellung der Spalten werden aus den sinusförmigen Teiltönen, obertonhaltige harmonische Teilklänge. [Quelle: Koenig 1881b, 386]

Im Gegensatz zum Stimmgabelsynthesizer von Helmholtz ist es mit Königs Apparat möglich, die Teiltonphasen gezielt einzustellen, ohne dabei ihre Amplitude zu verändern. Die Einzeltöne wurden mittels Helmholtz-Resonatoren auf Obertonfreiheit getestet. Der Test müsste jedoch das Zusammenwirken, das heisst die Überlagerung kontrollieren, da die einzelnen Sinusschablonen von der gleichen Windlade bedient werden.

Die Schwingungsform der Luft kann bei der Schablonensirene ohne Wechsel der Schablone und ebenso bei den einzelnen Schablonen im Syntheseapparat dadurch modifiziert werden, dass die Düse schräg zur Auslenkungsrichtung gestellt wird (aber so, dass sie noch immer orthogonal zur Schablonenoberfläche steht). Eine solche Schrägstellung bewirkt aus geometrischen Gründen folgende Deformation einer Sinusschwingung, dem „Input“ von der Schablone:



Deformation einer Sinusfunktion durch Scherung in Normalrichtung des Spaltes. Der im Vergleich zur Sinuskurve steile, linksseitige Flankenanstieg im angenommenen deformiertem Schalldruckverlauf führt im Fourierspektrum zu einem hohen Teiltongehalt. [Quelle: Koenig 1881a, 348]

Es wird dabei vorausgesetzt, dass der Luftdruckverlauf des gehörten Schalls genau proportional zur Menge der ungehindert ins Sireneninnere gelassenen Luft ändert. Koenig schreibt hierzu:

Bläst man eine einfache Sinuscurve durch eine normale Spalte an, so hört man einen schwachen, sehr sanften Ton, der durchaus den Character eines einfachen Tones zu haben scheint, sobald man jedoch die Windspalte etwas schräg stellt, wird der Klang sofort stärker und schärfer, und geht bei genügender Abweichung der Spalte von der Normalen in den Klang einer durchschlagenden Zunge, also einen Klang mit starken harmonischen Tönen über. [Koenig 1881a, 348]

Die vorsichtige Formulierung „der durchaus den Character eines einfachen Tones zu haben scheint“ könnte als leiser Zweifel an der sinusförmigen Gestalt, aber auch am Begriff des einfachen Tons gedeutet werden, das heisst an der Gleichsetzung des „Einfachen“ mit dem „Sinusförmigen“. Bemerkenswert ist ferner die von Koenig bemerkte Zunahme der Lautstärke als Folge der geometrischen Gestaltveränderung. Ist die Schräglage der Düse parallel zur Maximalsteigung der Schablone, resultiert linksseitig eine maximal steile Flanke. Die Gestaltveränderung bewirkt neben der Zunahme der *Schärfe* auch eine Zunahme der *Lautheit*. Die steile Flanke stellt ein Indiz für eine grosse Zahl Teiltöne in Sinuslage bezüglich dem Durchgang durch die Nullage (auf halber Höhe der Kurve!) dar. Ein kontinuierliches Verändern der Düsenausrichtung hat eine stetige Änderung im Spektralvektor [vgl. Kap. 8.1] zur Folge. Aus Koenigs Beschreibung scheint hervorzugehen, dass die Zunahme der Schärfe erst bei genügender Abweichung von der Normalenrichtung auch zu wahrnehmbaren Obertönen führt.

Aufgrund der Scherung der Gestalt ist über die ganze Periode gesehen kein besondere Lautstärkenänderung zu erwarten (quadratische Integration der beiden Kurven bez. Nullage; aus der Differenz der Werte kann dann die Lautstärkenänderung ermittelt werden). Die Änderung der Lautstärke wäre also auf den nicht linearen Amplitudengang des Gehörs zurückzuführen. Ein Klang mit hohen Teiltönen bewirkt nämlich, wenn diese in Zonen erhöhter Empfindlichkeit fallen, bei gleicher Schalleistung wie ein Sinuston eine Zunahme der Lautheit.

Zur Untersuchung des Einflusses der Phasenrelationen periodischer Klänge untersucht Koenig in systematischer Weise drei Typen von Klangspektren:

- (i) Spektren mit Teiltönen gleicher Intensität
- (ii) Spektren mit Teiltönen deren Teiltonintensitäten nach einem einfachen Bildungsgesetz abnehmen
- (iii) Spektren mit Formanten.

Für die Testklänge sind für je vier ausgezeichnete Phasenbeziehungen die Zeitfunktionen über zwei volle Perioden gezeichnet. Der Synthese-Apparat ist so konstruiert, dass diese Spezialfälle in kurzem zeitlichen Abstand von einander realisiert werden können. In der Schablone-Sirene braucht es dazu pro Amplitudenspektrum zwei Streifen mit je zwei Kurvenverläufen.

Insgesamt hat Koenig offenbar die Versuche mit beiden Typen von Sirenen durchgeführt, eine Statistik liegt der Arbeit aber nicht bei.

Die Zeitverläufe in der ersten und dritten Spalte sind jeweils punktsymmetrisch zu den um eine halbe Periode von einander entfernten Nulldurchgängen, und die Töne der Spalte 3 sind die Zeitumkehr der Töne von Spalte 1. Die Töne in der ersten Spalte enthalten im Fourierspektrum ausschliesslich negative und diejenige der dritten ausschliesslich positive Sinuskomponenten.

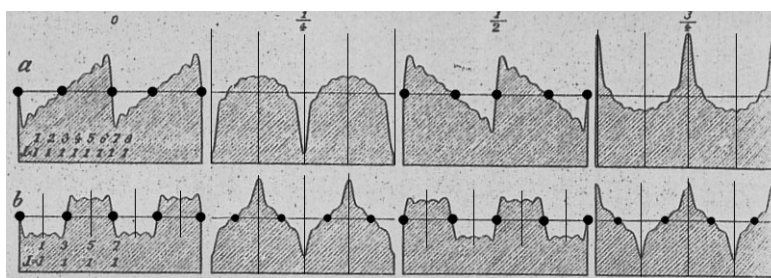
Die Spalten 2 und 4 hingegen enthalten nur Teiltonkomponenten in Cosinuslage und sind folglich spiegelsymmetrisch zu vertikalen Achsen im Abstand jeweils einer halben Periode. Die Töne von Spalte 4 entstehen aus den Tönen von Spalte 2 durch Spiegelung an der Zeitachse, diejenigen von Spalte 2 enthalten ausschliesslich negative und diejenige von Spalte 4 ausschliesslich positive Cosinuskomponenten.

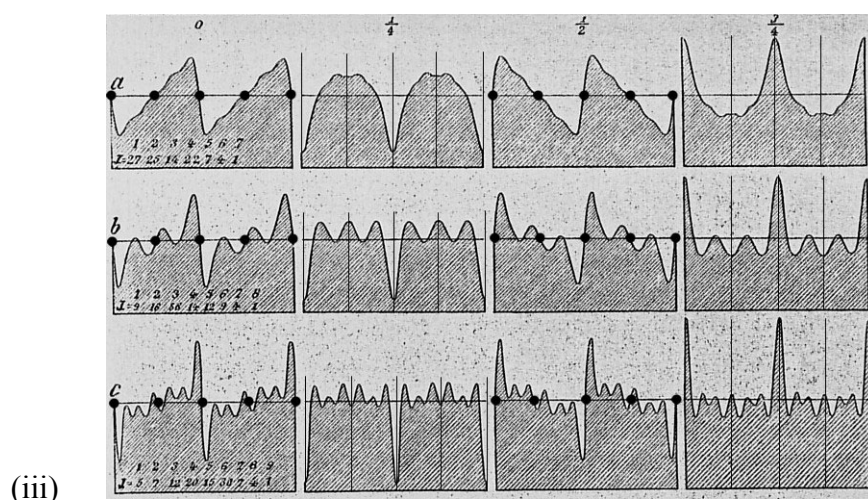
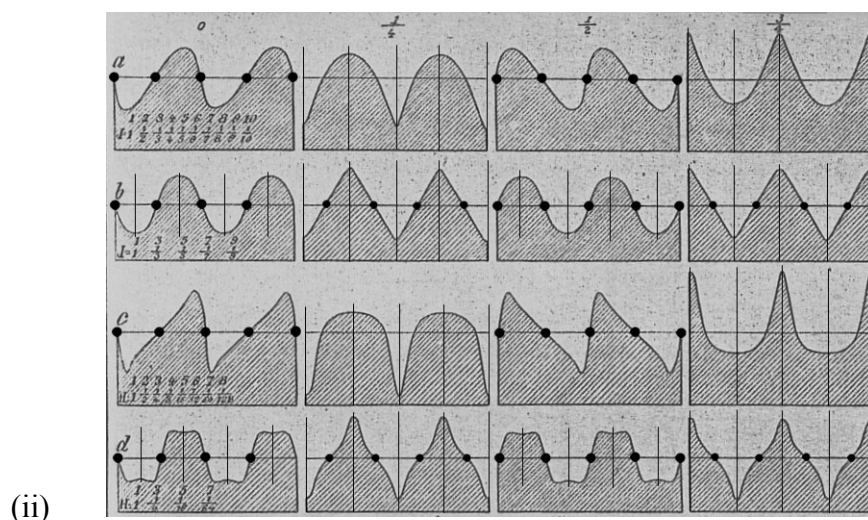
Bei Spektren mit nur ungeradzahligen Teiltönen, (i)b sowie (ii)b und (ii)d, ergeben sich bei den ausgezeichneten Phasenbeziehungen zusätzliche Symmetriepunkte bezw.

Symmetrieachsen. Diese Kurvenverläufe sind sowohl zeit- als auch punktsymmetrisch. Die Kurvenverläufe von Spalte 1 und 3 sowie von 2 und 4 sind folglich die gleichen, wenn man sie um eine halbe Periodendauer verschiebt. Dass bei diesen keine Klangunterschiede zu bemerken sind, wertet Koenig als Evidenz für die Qualität seiner Synthese.

Bei beliebigen Phasenbeziehungen gehen die Symmetrien im Kurvenverlauf in der Regel verloren.

(i)





[Koenig 1881b, 380,381,383] Testtöne zur Klärung der Phasenfrage. Die Darstellung verwendet invertierte Farbwiedergabe. Symmetriepunkte und -achsen wurden ergänzt. (Beschreibung im Text.)

Offenbar geht Koenig davon aus, dass die Intensität als Funktion der Frequenz proportional zur Frequenz ist, denn die Funktionen in (i) stellen die Funktionen dar, deren Amplituden sich in Abhängigkeit der Partialtonordnung n wie $1/n$ verhalten. Koenig nimmt für diese an, dass sie die gleiche Intensität haben. Der 3-te Teilton mit der Amplitude $1/3$ hat die gleiche Intensität wie der Grundton mit Amplitude 1, was Hermann (1896) zu Recht kritisiert.. Die Funktionen (i) a 1. und (i) a 3. stellen bei gegebenen Teiltonfrequenzen die besten Näherungen an eine Sägezahnschwingung mit vertikalen Flanken dar, und (i) b 1. und (i) b 3. sind die besten Näherungen an die Rechteckschwingungen. Die Funktionen von (i) a sind dieselben, die von Plomp 1973, ebenfalls zur Klärung der Phasenfrage, auf digitalem Wege hergestellt wurden. Die Funktionen (i) a 2. und (i) a 4 haben die bemerkenswerte Eigenschaft, dass ihr Kurvenverlauf bei zunehmender Zahl approximierender Teiltöne (für $n \rightarrow \infty$) zu Beginn der Periode ($t = i \cdot T$, $i \in \mathbb{N}$), nicht beschränkt bleibt ($|f(i \cdot T)| \rightarrow \infty$). Demgegenüber bleibt bei den Sägezahnäherung der Verlauf beschränkt, nur die Flanke wird beliebig steil, dass heisst die Ableitung ist an den korrespondierenden Stellen nicht beschränkt ($|f'(i \cdot T)| \rightarrow \infty$). Koenig thematisiert diese physikalisch schlecht realisierbaren steilen Flanken als möglichen Einwand dafür, dass bei der Schablonensirene „die Form der Luftwellen, wie sie durch die hier angewendete Methode erzeugt wurden, nur wenig den Curven entsprach, gegen welche man die Windspalte richtete“ [Koenig 1881b, 384], da diese Unstetigkeiten im Kurvenverlauf nicht vernachlässigbare Druckänderungen in der Luftmasse der Windlade verursachen könnten. Der Einwand scheint ihm, wegen des

Abstandes der Düse von der Schablone nur bedingt berechtigt, bei der additiven Methode am Syntheseapparat falle er ganz weg [Koenig 1881b, 384-385].

Die Signale aus (iii) synthetisieren Vokale, und zwar auf Basis von Angaben von „Auerbach bei den Vocalklängen *Ou*, *O*, *A* mit dem Grundtone *c* (*ut*₂)“ [Koenig 1881b, 383]. Koenig schreibt über die Qualität der Synthese:

Beiläufig sei übrigens hier erwähnt, dass diese drei Curven in Bezug auf die Nachahmung der Vocale ungenügende Resultate geben, nur mit Fig. IV *c* [= (iii) *c*, *dm*] erhielt man bei kurzer stossweiser Hervorbringung des Klanges ein erträglich gutes *A*, jedoch nicht für den Grundton *c*, sondern wenn dieser in die Gegend von *f* (*fa*₂) und *g* (*sol*₂) fiel. [Koenig 1881b, 384-385]

Generell empfand Koenig die Klänge mit starken *Peaks*, die sich bei gleichgerichteten Teiltönen in Cosinuslage ergeben als „stärker und schärfer“ als Klänge mit gleichem Amplitudenspektrum, bei denen sich alle Teiltönen in Sinuslage befinden. Die Variation der Phasenbeziehung hätte demnach nicht nur eine Veränderung der Klangfarbe sondern auch der Lautheit zur Folge! Meine eigenen Versuche mit Signalen der Form (i) *a* hinterliessen einen ähnlichen Eindruck (d/a-gewandelte berechnete Fouriersynthese). Die Untersuchungen von Plomp ergeben, dass die Signale von (i) *a* 2/ (i) *a* 4 unter allen Phasenkonstellationen mit gleichem Amplitudenspektrum für die Wahrnehmung maximal verschieden seien [vgl. Kap. [6.14](#)].

Ein anderer Versuch von König, eine Kombination aus Lochsirene und Stimmgabel, erlaubt die Erzeugung von grundfrequenzfreien periodischen Klängen. Es handelt sich um periodische Impulse, die ihrerseits aus einem an- und abschwellenden Sinuston zur Stimmgabelfrequenz bestehen. Aus diesem Versuch scheint der erste zwingende Beweis für Residualtöne zu folgen. Die Orgelmixturen zur Erzeugung von tiefen Tönen aus höheren genügen dazu nicht. Ihre Grundtöne sind zugleich Differenztöne und könnten schon in der Luft entstanden sein [vgl. Barkowsky 1996, 233-238].

6.5. Hermann (1896)

Hermann führt seinerseits Signalspiegelungen am Phonographen durch und kann dort keine Klangfarbenunterschiede feststellen. Die Klangunterschiede bei Königs Tönen können als Unterschiede in den Amplitudenverhältnissen, die sich aus den nicht kongruenten Signalformen ergeben, gedeutet werden. Eine plausible Erklärung für diese Asymmetrie gibt ter Kuile 1902. [Hermann 1896, 347–350]

Anlass für die Kontroverse zwischen Koenig und Hermann sind die von Koenig beobachteten „Stösse“ und „Stosstöne“ bei verstimmten harmonischen Intervallen.

Unter der Annahme, dass die Stimmgabeln obertonfrei sind, liegen hier Phaseneffekte vor, die über die kritische Bandbreite hinaus wirksam sind. Koenig beobachtet sogar Schwebungen mit der verstimmten dreifachen Oktave. Die Versuche von Koenig sind in England von William Thomson (1877/78) wiederholt worden und ausführlich beschrieben [vgl. Kap. [6.3](#)]. Bei den Stosstönen geht es Koenig vor allem darum, ihre Deutung als Kombinationstöne auszuschliessen. Sie ergeben sich nach seiner Auffassung allein aus den periodischen Hüllkurvenschwankungen. Bei den Schwebungen verstimmter Intervalle liegt ihm daran, zu beweisen, dass sie nicht als Schwebungen mit Kombinationstönen zu deuten sind.

Der Widerspruch gegen seine Schwebungsversuche kommt von anderer Seite: Die Stimmgabeln sind gemäss Hermann nicht genügend obertonfrei. Der Effekt erkläre sich

nämlich aus Schwebungen des höheren Tons mit dem ersten Oberton der tieferen Stimmgabel.

Um so entschiedener wehrt er sich gegen meine Behauptung, dass man, wenn die Grundnote ein wenig verstimmt ist, sodass die Phasencoincidenzen sich periodisch ändern, ausser den beiden Stimmgabeltönen nichts weiter hört, als die Schwebungen der reinen Octave mit dem ersten Oberton der verstimmt Grundnote. [Hermann 1896, 391]

Und in Bezug auf Thomson

[...] weil er meint, dass die König'schen Resonanzstimmgabeln reine , obertonfreie Töne geben. Hätte er gewusst, was seitdem vielfach constatirt ist, dass die Obertöne vorhanden sind, so wäre er zu demselben Schlusse gelangt wie ich. So aber schliesst er umgekehrt, dass erstens die Stösse unreiner Octaven von den Phasenverschiebungen herrühren, zweitens, dass das Ohr, da man im angegebenen Falle nur zwei und nicht vier Schwebungen hört, die Eindrücke a und c, b und d nicht als identisch empfindet, also die Ordinateurichtungen (push und pull) unterscheiden kann. [Hermann 1896, 393]

Hermann erwähnt zwei weitere Erklärungsmöglichkeiten:

- Schwebungen mit subjektiven Obertönen (ein Argument von Helmholtz 1876)
- Schwebungen mit Differenzton.

Die zweite Möglichkeit wird von Hermann aufgrund der Anzahl der Schwebungen verworfen. Die erste als zusätzlicher Effekt nicht ausgeschlossen.

Spätere Versuche mit (echten) Sinustönen belegen diese sogenannten Schwebungen zweiter Ordnung und widerlegen demnach Hermanns Deutung als Obertonschwebungen [Beasley 1930: vgl. Kap. 6.7].

Die Deutung der Stosstöne als wahrgenommene Periodizität in der Hüllkurve wird von Thomas Young bereits 1800 gegeben: Genügend rasche Schwebungen können in einen Tonhöhereindruck übergehen. Die von Tartini und Romieu beobachteten Differenztöne seien als solche Periodizitäten im Schallsignal zu interpretieren.

Schulze versucht 1916 die Stosstöne mit der Helmholtz'schen Resonanztheorie zu erklären. Das Phänomen der Schwebungen höherer Ordnung wird von ter Kuile [1902], Beasley [1930], Chocholle, Segal [1947/1957] wieder aufgegriffen.

6.6. ter Kuile (1902)

Die Arbeit *Einfluß der Phasen auf die Klangfarbe* [Kuile 1902] ist mit fast 100 Seiten, die bis zu diesem Zeitpunkt umfangreichste Untersuchung zum Thema Phasen und Klangfarbe. Die historische Darstellung bezieht nur Literatur seit Helmholtz ein (König, Thomson, Hermann) ein. Ter Kuile kritisiert an Hermanns Phonographenversuchen, dass sie nur einen Spezialfall behandeln, bei dem ohnehin keine besonderen Klangunterschiede zu erwarten seien.

Ausserdem ist unklar, wie weit sich die „gepiegelten“ Klänge in ihrem Schalldruckverlauf unterscheiden. Ist ihr Verlauf tatsächlich gespiegelt?

Einen auffallenden Unterschied könne man, so ter Kuile, nur erwarten, „wenn irgend ein Factor des Phasenverhältnisses das eine Mal in maximo, das andere Mal in minimo vorhanden ist.“ [Kuile 1902, 351] Aus diesem Grunde scheinen ihm Schwebungsversuche, bei denen sich diese Faktoren periodisch ändern, am geeignetsten zur Klärung der Frage. Die Deutung eines geringfügig verstimmt Teiltönen in einem periodischen Klang als unverstimmter Ton mit periodisch ändernder Phasenbeziehung zum Restklang wurde schon von Thomson 1877 [vgl. Kap. 6.3] gegeben und lautet prägnant ausgedrückt:

Frequenzverschiebung = Phasenmodulation

Ter Kuile untersucht Klänge aus drei Teiltönen, bei denen einer verstimmt wird. Er verwendet dazu Stimmgabeln (Ihre Eigenfrequenzen sind ganzzahlige Vielfache von 100 bzw. 150 Hz). Die beiden andern Teiltöne definieren einen periodischen Klang, dessen Periodizität – in Abhängigkeit von den Partialtonordnungen – ein ganzzahliger Teiler der Periodizität des unverstimmten Dreiklangs ist:

$$\begin{array}{llll} 4 : (5+\Delta) : 6 & \rightarrow & 4 : 6 = 2 : 3 & \rightarrow \text{Periode} = 1/2 \\ 4 : 5 : (6+\Delta) & \rightarrow & 5 : 6 \text{ teilerfremd} & \rightarrow \text{Periode} = 1 \end{array}$$

Die gleiche Frequenzänderung führt also je nach betroffener Komponente zu einer unterschiedlichen Modulationsrate des Gesamtklanges. Dass überhaupt Schwebungen beobachtet werden können, steht im Widerspruch zum Ohmschen Gesetz, und zwar für Töne, die nicht unmittelbar benachbarte Zonen der Basilarmembran anregen. Die beobachteten Schwebungen stimmen aber nicht in jedem Fall mit der Modulationsfrequenz des Gesamtklanges überein. Der Klang $5 : (6+\Delta) : 7$ ergibt gemäss ter Kuile nämlich 2Δ Schwebungen, und nicht Δ wie erwartet (5 und 7 sind ja teilerfremd). Dennoch gibt ter Kuile eine rechnerische Bestimmung der wahrgenommenen Schwebungsfrequenz, und zwar aufgrund der Schwingungsform: Die Periodizität der Schwebungen ergibt sich aus dem kürzesten Zeitabstand nach dem wieder die gleichen Phasendifferenzen auftreten. Dies kann bereits bei einem ganzzahligen Teiler der Gesamtperiode der Fall sein. [Bei Symmetrien im Signalverlauf können die gleichen Phasendifferenzen schon früher auftreten.] Dass die Schwebungen bereits bei geringen Lautstärken auftreten, lassen ihre Erklärung mittels Obertonschwebungen unwahrscheinlich erscheinen. Dass sie auch als Kombinationstonerscheinungen gedeutet werden könnten, kann nicht darüber hinwegtäuschen, dass eine zyklische Änderung der Phasenbeziehungen als zyklische Veränderung der Klangfarbe wahrgenommen werden kann. [Kuile 1902, 338, 345]

6.7. Beasley (1930)

Beasley untersucht die Variation der Schwingungsform beim Frequenzverhältnis $2 : 3$ unter Veränderung der Phasenbeziehung und gleicher Amplituden. Die Maximalauslenkung der zusammengesetzten Kurve variiert dabei um 4.5%. Im Experiment wurden Sinustöne der Frequenzen 1500 und 2250 Hz verwendet. Für Lautstärken 10 db über der Hörschwelle konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen der Situation konstante Phase (R) und zyklisch ändernde Phasenbeziehung (S) (Zyklus 30 sec) festgestellt werden (Fluktuation der Aufmerksamkeit). Die Präsentation verschiedener Phasenlagen nacheinander (je 2 bis 3 sec) zeigt überhaupt keine Unterschiede der Tonqualität. Bei Lautstärken 25–30 db über der Hörschwelle konnten die zyklischen Veränderungen der Lautstärken mit 90%-iger Sicherheit die Situation R von der Situation S unterschieden werden. (Höhere Intensitäten waren im Experiment nicht möglich, da dadurch objektive Obertöne die Wahrnehmungsgrenze überschreiten.) Die wahrgenommenen Unterschiede stehen gemäss Beasley in keinem Verhältnis zur grundlegenden Änderung der Schwingungsform, sondern könnten mit einem Mechanismus zur Detektion der Maximalauslenkung, das heisst mit einem einzigen Parameter vollständig erklärt werden.

Bemerkenswert am Versuch ist die Tatsache, dass die stationäre von der zyklisch ändernden Situation überhaupt unterschieden werden kann, und zwar bei einem Frequenzabstand und

einer Lautstärke, bei denen eine gegenseitige Beeinflussung der Anregungszonen nicht zu erwarten ist.

6.8. Chapin, Firestone (1934)

Die Autoren untersuchen den Einfluss der Phasenbeziehung von periodischen Signalen in Zusammenhang mit subjektiven Obertönen. Sie gelangen zur Auffassung, dass subjektive Obertöne in Cosinusphase zum erzeugenden Ton stehen (d. h. das deformierte Sinussignal bleibt zeitsymmetrisch). Durch Variation der Phase eines Testsignals mit gleicher Frequenz wie der subjektive Oberton treten Interferenzerscheinungen auf. Sind dabei Testton und subjektiver Oberton bei gleicher Amplitude genau gegenphasig, so wird der subjektive Oberton ausgelöscht. Ein Signal mit höherer Gesamtenergie führt demzufolge zu einer geringeren Lautstärkeempfindung und aufgrund des veränderten Spektrums deshalb auch zu einer veränderten Klangfarbe. Bei Lautstärken bei denen subjektive Obertöne auftreten, ist die Lautstärke und Klangfarbe klar von den Phasenbeziehungen der Teiltöne abhängig und mit einer Ortstheorie verträglich.

6.9. Schouten (1938/1940/1941)

Mit den Arbeiten von Schouten wird eine grössere Öffentlichkeit mit der Erscheinung der Residualtöne bekannt gemacht. Er weist auf die Unterschiede zu anderen „subjektiven Tönen“ hin. Kombinationstöne und subjektive Obertöne sind auf der Basilarmembran real wie Töne von der Aussenwelt vorhanden. Sie unterliegen deshalb den bekannten Interferenzerscheinungen wie Auslöschung, Verstärkung und Schwebungen. Residualtöne hingegen können nicht ausgelöscht werden und schweben auch nicht mit einem Sinuston der gleichen Frequenzregion. Residualtöne sind kollektive Manifestationen einer Gruppe nicht individuell wahrnehmbarer Partialtöne. Die ihnen zugeordnete Tonhöhenempfindung entspricht der Periodizität des Signals, das aus diesen Teiltönen gebildet wird. Es ergibt sich daraus, dass die gleiche Tonhöhe an verschiedenen Stellen auf der Basilarmembran verursacht werden kann. Insbesondere ist also eine gleichzeitige Wahrnehmung mehrerer Töne mit gleicher Tonhöhe möglich. Das Ohmsche Gesetz erfährt bei Schouten eine Neuformulierung dahingehend, dass auf der Basilarmembran eine Zerlegung in mehrere „Perzepte“ stattfindet. Ein solches Perzept ist entweder eine Fourierkomponente oder eine Gruppe von nicht-aufgelösten Partialtönen, denen eine Periodiktonhöhe zukommen kann. In der Arbeit von 1938 neigt Schouten noch dazu, einen Mechanismus, der die Periodizität in der Hüllkurve des Gesamtsignals detektiert, zu postulieren. Später scheint er davon auszugehen, dass dies für die je nach Stelle auf der Basilarmembran ausgefilterte unterschiedliche Signalgestalt der Fall ist.

Schouten weist ferner darauf hin, dass für Lautstärken, bei denen subjektive Obertöne auftreten, die Klangfarbe von der Phase der physikalischen Teiltöne stark abhängig ist: Je nach gegenseitiger Phasenlage schwächen oder verstärken sich die subjektiven und die objektiven Partialtöne, was neben der eigentlichen Klangfarbenänderung auch eine Veränderung der Gesamtlautstärke zur Folge hat.

6.10. Mathes & Miller (1947)

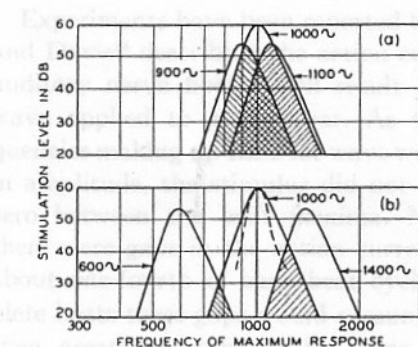
Die Klangqualität eines stationären Klangs hängt auch von der Gestalt der Hüllkurve ab, die durch Veränderung der Phasenbeziehungen beeinflusst wird.

Durch Veränderung der Phase des Trägers eines amplitudenmodulierten Signals um 90° erhält man die erste Näherung eines frequenzmodulierten Signals (dieses hat eine nahezu konstante

Hüllkurve), das weniger rau klingt. Die Effekte spielen sich im Bereich einer kritischen Bandbreite ab [vgl. die Einleitung zu Kap. 5].

verbunden sein. Diese Eigenschaft der Hüllkurve kann durch Veränderung der Phasen beeinflusst werden. Die Autoren geben auch einen quantitativen Vergleich von Amplituden- und Phaseneffekten.

Im Bereich, in denen die einzelnen Partialtöne eines Signals nicht isoliert wahrgenommen werden können, innerhalb einer kritischen Bandbreite (ab 500 Hz etwa eine grosse Terz) sind also Phaseneffekte auch bei gemässiger Lautstärke zu verzeichnen, die sich mit dem Ohmschen Gesetz schlecht vertragen. Solche wurden von Helmholtz nie ausgeschlossen. Gewöhnliche Schwebungen sind ja auch solche Phaseneffekte! Bemerkenswert für die Periodiktöne und mit Helmholtz' Theorie nicht zu erklären ist, dass sie je nach gegenseitiger Phasenlage auftreten oder nicht. Dies ist ein starkes Argument für eine Auswertung der Zeitgestalt des Signals. Der Periodizitätsdetektor könnte zum Beispiel ausgeprägte Maxima im Zeitsignal auswerten.



Sensorische Response-Pattern bei AM und QFM-Signalen (schematisch) aus drei Teiltönen in Abhängigkeit von der Modulationsfrequenz (= Frequenzabstand benachbarter Teiltöne). Im oberen Beispiel ist, gemäss den Autoren damit zu rechnen, dass jede Veränderung der Phasenbeziehung bedeutsam wird. Je grösser die laterale Entfernung der Resonanzberge, desto weniger sind Phaseneffekte zu erwarten [Quelle: Mathes et al. 1947, 793].

Periodiktöne kann es nach Helmholtz gar nicht geben: schnelle Schwebungen zweier Sinustöne können nur dann zu einer Tonhöhenwahrnehmung führen, wenn sich gleichzeitig, lautstärkebedingt, ein Differenzton bildet, also nur als eine Nicht-Linearität.

6.11. Chocholle & Legoux (1957)

Schwebungen zwischen Sinustönen deren Frequenzverhältnis um wenig von einem ganzzahligen einfachen Verhältnis abweichen (higher order beats). Die Versuche können nicht mit Schwebungen mit subjektiven Obertönen erklärt werden. Schlussfolgerung: Das Ohr ist fähig, globalen Veränderungen der Hüllkurve zu folgen. (Hinweise auf M. F. Meyer, 1949 und Chocholle & Segal, 1947)

6.12. Schouten, Ritsma, Cardozo (1962)

J. F. Schouten, R. J. Ritsma, B. Lopez Cardozo, Pitch of the Residue, JASA 34, 1962, 1419–1423

Ein Klang aus einer kleinen Anzahl genügend weit auseinander liegenden Teiltönen erlaubt die Wahrnehmung jeder einzelnen Komponente. Falls die Teiltöne eng beieinander liegen,

misslingt die Fourieranalyse teilweise oder vollständig und das Ohr hört den Autoren zu Folge nur „one single percept of sharp timbre“ (ein einziges Perzept mit einer scharfen Klangfarbe). Falls die Frequenzen der Teiltöne Vielfache (einer nicht im Signal vorhandenen) Grundfrequenz sind, kann ein solches Perzept eine entschieden tiefe Tonhöhe haben. Ein solches Perzept heisst Residuum. Es wurde von Schouten 1938 an periodischen Impulsen zur Grundfrequenz 200 Hz entdeckt [vgl. Kap. 6.9].

Die *Lautstärke* des Residuums kann diejenige der Grundfrequenz bei weitem übersteigen, falls die Zahl der unaufgelösten Teiltöne genügend gross ist. Die *Schärfe* hängt von der Durchschnittsfrequenz der involvierten spektralen Region ab. Diese Durchschnittsfrequenz stimmt im Falle einer ungeraden Zahl äquidistanter Frequenzen mit der Trägerfrequenz überein (FM). Eine gegenseitige Verdeckung des Residuums mit einem Ton gleicher Tonhöhe konnte nicht beobachtet werden. Es handelt sich folglich nicht um eine reale Frequenzkomponente der bekannten Art (gewöhnlicher Ton oder Verzerrungsprodukt). Die Autoren leiten aus diesen Angaben eine Neuformulierung des Ohmschen Gesetzes ab.

6.12.1. Neuformulierung des Ohmschen Gesetzes

- Das Ohr analysiert komplexe Klänge in eine Anzahl getrennte Perzepte.
- Einige dieser Perzepte korrespondieren mit den Fourierkomponenten, welche im Schallfeld des Innenohrs vorhanden sind. Diese Perzepte haben die Klangfarbe eines reinen Tons und die Tonhöhe der entsprechenden Fourierkomponente.
- Darüber hinaus können ein oder mehrere Perzepte vorhanden sein, die nicht mit einer einzigen Fourierkomponente korrespondieren, sondern mit einer Gruppe von Fourierkomponenten. Ein solches Perzept hat eine scharfe Klangfarbe und, falls tonal, eine Tonhöhe, die der Periodizität des time-patterns der unaufgelösten spektralen Klangkomponenten entspricht. [Schouten et al. 1962, 1418–1419]

Die Unterscheidung in tonales und atonales Residuum geht auf de Boer 1956 zurück.
 tonal: Frequenzregion bis 3000 Hz, Periodizität zu Frequenzen zwischen $1/5$ und $1/20$ der Mittelfrequenz.

6.12.2. Residualtöne im Lichte von Orts- und Zeittheorie der Frequenzverarbeitung

Die Ortstheorie besteht aus zwei Thesen:

- Auf der Basilarmembran findet eine räumliche Frequenzerlegung mit begrenzter Auflösung statt.
- Die Tonhöhe ist durch die stimulierte Region auf der Basilarmembran bestimmt.

Die Erklärung des Residuums als nicht-lineares Verhalten des Innenohrs (Differenzton) ist widerlegt: Denn Residualtöne treten bei gemässiger Lautstärke auf, sie können nicht durch Sinustöne ähnlicher Tonhöhe maskiert werden und sie bilden solchen Testtönen keine Schwebungen. Verzerrungsprodukte (Differenztöne und subjektive Obertöne) sind reale Frequenzkomponenten des inneren Spektrums. Sie können also von Sinustönen maskiert werden und mit Sinustönen ähnlicher Lautstärke und Frequenz Schwebungen hervorrufen.

Die Befunde gegenüber der Ortstheorie lauten:

- Stimulierung eines Bereichs der Basilarmembran kann Anlass für die verschiedenartigsten Tonhöhenempfindungen sein. Es handelt sich bei diesen Frequenzen um Modulationsfrequenzen, die im einfachsten Fall der Periodiktöne, die

Wiederholungsrate des Teilsummensignals nicht aufgelöster Teiltonkomponenten aufweisen. Ihre Frequenz ist die grösste gemeinsame Untertonfrequenz, das grösste gemeinsame Mass der Teiltonfrequenzen eines Perzepts.

- Ein Klang kann aus mehreren Perzepten mit gleicher (oder nahezu gleicher Tonhöhe) bestehen.

Der Tonhöhenextraktor könnte im Zeit- oder im Frequenzbereich operieren. Eine Frequenztheorie ist zur Zeit noch nicht verfolgt worden [vgl. später Goldstein, 1973]

Die beiden Pitch-shift-Effekte zeigen, dass die Deutung des Residuums als Periodiktöne nur einen Teil der Fälle erklärt. Beide Effekte zeigen, dass eine Deutung als Differenzton nicht in Frage kommt. Der zweite Effekt bedeutet aber auch, dass eine direkte Deutung als Modulationsfrequenz frequenzmodulierter Signale nicht möglich ist.

Erster Pitch-shift-Effekt (Shouten 1940):

Frequenzgemisch:	1800 - 2000 - 2200	↔	1840 - 2040 - 2240
Residualtonhöhe.	200	↔	204

Ausgehend von drei harmonischen Obertonfrequenzen im Verhältnis 9 : 10 : 11 zum Grundton 200 Hz, erhöht sich bei Verschiebung der drei Frequenzen um den gleichen Frequenzbetrag 40 Hz auch die Residualtonhöhe und zwar so, als ob die mittlere Frequenz der zehnte harmonische Teilton wäre und die Seitenfrequenzen, der neunte und elfte. In Wirklichkeit ist 40 Hz die Wiederholungsrate der Summenschwingung und die Teiltonnummern sind 46, 51 und 56. Die drei Töne können je nach Phasenlage als amplituden- oder quasi-frequenzmodulierte Signale der Trägerfrequenz 2040 Hz zur Modulationsfrequenz 200 Hz gedeutet werden. Auch die Differenzfrequenz der drei Töne beträgt 200 Hz. Es ist deshalb hervorzuheben, dass die Residualtonhöhe nicht mit der Periodizität übereinstimmt.

Zweiter Pitch-shift-Effekt

Verfeinerte Messungen ergeben gegenüber dem ersten Pitch-shift-Effekt:

- Der shift (die Tonhöhenverschiebung) ist konsistent etwas grösser als die objektiven Modulationsfrequenzen.
- Die Vergrösserung des Frequenzabstandes bei konstanter Mittelfrequenz bewirkt eine leichte Vertiefung der Residualtonhöhe. [1420–1421]

Der Effekt wird als lineare Funktion der Mittelfrequenz und der Frequenzdifferenz der Komponenten modelliert. Dies ist eine rein deskriptive Modellierung des festgestellten Zusammenhangs und keine Erklärung.

Die Phänomene des Pitch-shift-Effekts schliessen einen Tonhöhen-Extraktor im Frequenzbereich aus. Die Erklärung der Residualtonhöhe als Hüllkurvenperiodizität ist auch nicht schlüssig, denn diese ist allein durch die Frequenzdifferenz bestimmt. Der Tonhöhenextraktor muss also die Feinstruktur des Signalverlaufs auswerten.

De Boer pointed out that a fair description of the first effect of pitch shift is given when assuming that the distance of f peaks closest to, but not necessarily coinciding with, g peaks is measured. This assumption also elegantly describes the phenomena of ambiguity of pitch as also the fact that the experimental line of settings extend up to and beyond the adjoining harmonic situations." [1424] [Das besprochene Signal setzt sich aus den drei Frequenzen : $f - g, f, f + g$ zusammen, dm.]

Die Überlegung von de Boer deckt sich mit derjenigen von Smith (1749) und Thomson (1877).

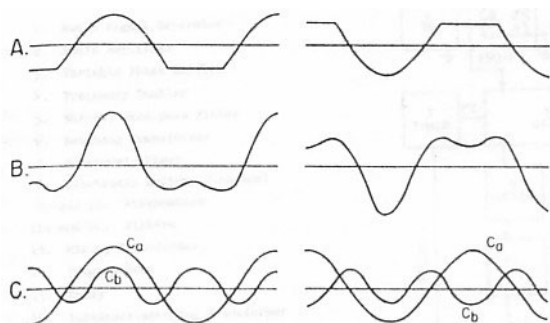
Der Tonhöhenextraktor brauche nicht unbedingt auf "f peaks within g peaks" zu operieren, er könnte auch auf Nullstellen des Trägersignals zu einer bestimmten Phase der Hüllkurve beruhen. Zum Zeitpunkt des Artikels stehe eine befriedigende Erklärung des zweiten Pitch-shift-Effekts noch aus.

Er lässt sich möglicherweise wie folgt erklären:

Aus Békésys Modellierung der Bewegung der Basilarmembran ergibt sich eine amplitudenabhängige Tonhöhenverschiebung bei Sinustönen. Bei Vergrößerung des Frequenzabstandes benachbarter Teiltöne nimmt die Lautheit des Mitteltons tendenziell ab, was eine Entlastung der betreffenden angeregten Zone und damit eine Tonhöhensenkung des gesamten Perzepts zur Folge hat.

6.13. Craig & Jeffress (1962)

Die Autoren geben einen Hinweis auf Charles L. Wood [1957, der vorgängig an der Zeitachse gespiegelte periodische Signale untersucht hat. Solche Signale können – trotz gleichem Amplitudenspektrum – eine verschiedene Klangfarbe haben (beispielsweise die sogenannten *half-clipped sinusoids*). Diese Untersuchung bestätigt eine Behauptung von König, die sich damals aber aus einer unvollkommenen Versuchsanordnung ergeben hat. Die von Craig und Jeffress untersuchten Signale bestehen aus nur zwei Partialtönen (den ersten beiden Fourierkomponenten einer halbseitig abgeschnittenen Sinus-schwingung). Damit liegt ein Phaseneffekt vor, der sich ausserhalb der kritischen Bandbreite abspielt und bei dem sogar geometrisch isomorphe Signalgestalten unterscheidbar sind.



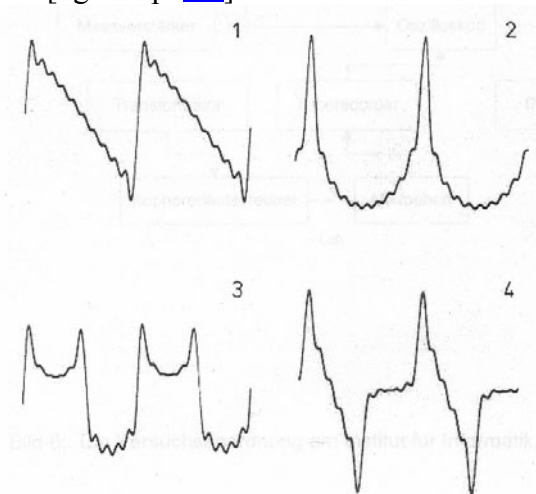
Umkehrsymmetrische Klänge. Halbseitig beschnittene Sinustöne wie in A werden in der Elektrotechnik verwendet. Sie weisen eine starke Asymmetrie bezüglich *push* und *pull* (Verdichtung und Verdünnung des Schalldrucks) auf. Die in B dargestellten Signale bestehen aus den ersten beiden Fourierkomponenten der Signale von A. Ihre Teiltöne sind in C dargestellt. [Quelle: Craig et al. 1962, 1753]

Wenn solche Klänge, die bei gleichem Amplitudenspektrum aus nur zwei Sinuskomponenten im Oktavabstand bestehen, unterscheidbar sind, dann ist dieser Effekt nicht als Interferenzerscheinung innerhalb eines kritischen Bandes zu bewerten. Denkbar wäre eine Interaktion mit subjektiven Obertönen, so dass dadurch die Amplitude des Oktavtons je nachdem verstärkt oder vermindert wird. In diesem Falle wären die subjektiven Intensitätsspektren der physikalisch im Umkehrverhältnis stehenden Klänge verschieden und es handelte sich um einen Amplituden- und nicht um einen eigentlichen Phaseneffekt. Aufgrund der verwendeten Lautstärken, nehmen die Autoren aber an, dass dies auszuschliessen sei. Hermanns Behauptung (1896), periodische Klänge im Umkehrverhältnis – in seinem Versuch durch Umpolung des Lautsprechers zu erreichen versucht – seien

ununterscheidbar, ist dadurch sogar für Teiltöne ausserhalb der kritischen Frequenzdifferenz widerlegt.

6.14. Plomp & Steneeken (1969), Plomp (1976)

Plomp et al. [1969], Plomp [1976] beschreiben Phasenversuche an periodischen Klängen, die aus 10 Fourierkomponenten bestehen. Es handelt sich um die gleichen Klänge mit Amplitudenfolgen wie $1/n$, die auch Koenig schon diskutiert hat. Die oberen Komponenten liegen dabei im gleichen kritischen Frequenzband. Die zu beobachtenden Veränderungen der Klangfarbe als Folge von Änderungen im Phasenspektrum sind nach diesen Untersuchungen im Vergleich zu denjenigen bei Änderungen des Amplitudenspektrums gering (quantitative Angaben werden gemacht). Die Arbeit ist teilweise so (miss-)verstanden worden, als ob die Phasenproblematik für die Klangfarbentheorie irrelevant sei [z. B. Bruijn 1978]. Ein Versuch derartige quantitative Vergleiche zur Aufstellung eines allgemeinen Klangfarbenraums, der die Amplituden-Phasen-Verhältnisse in gehörspsychologisch relevanter Weise abbildet, läge auf der Hand [vgl. Kap. 7.7].



Vier Klänge aus 10 Teiltönen mit gleichen Partialtönen ($a_n = 1/n$, $n = 1, \dots, 10$) zur Klärung der Phasenfrage. 1: nur Sinuskomponenten, 2: nur Cosinuskomponenten, 3 und 4: alternierend Sinus- und Cosinusbestandteile. Beispiele 1 und 2 wurden schon von Koenig [1881; vgl. Kap. 6.4] untersucht [Quelle: Plomp et al. 1969, 413]

Mit Hilfe multidimensionaler Skalierung [Tripelvergleich, Kruskal, vgl. Kap. 7.4] wurden die Phasenpattern dreidimensional klassifiziert. Die Autoren kommen zum Ergebnis, dass unter allen berücksichtigten Phasenkonstellationen – auch solche mit zufälligen Phasen – in dieser dreidimensionalen Struktur, die Signale 1 und 2 von den Signalen 3 und 4 je maximal entfernt sind. Quantitativ sei der Effekt der Phase auf die Klangfarbe höchstens mit einer Amplitudenänderung vergleichbar, die eine Lautstärkeänderung von 6dB/Oktave bewirke. Phasen- und Amplitudeneffekte seien aber weitgehend unabhängige Determinanten der Klangfarbe. Bei Grundfrequenzen über 150 Hz wird der Effekt schwächer. Verschiedene Versuchspersonen sind stark unterschiedlich phasensensitiv [Plomp et al. 1969, 417]. Die Autoren verwendeten digitale 8-bit Signale, die über Kopfhörer (mit flachem Phasengang bis 2000 Hz) beidohrig dargeboten wurden (die Prozessorzyklen waren zu dieser Zeit noch sehr lange: 1.75 μ s).

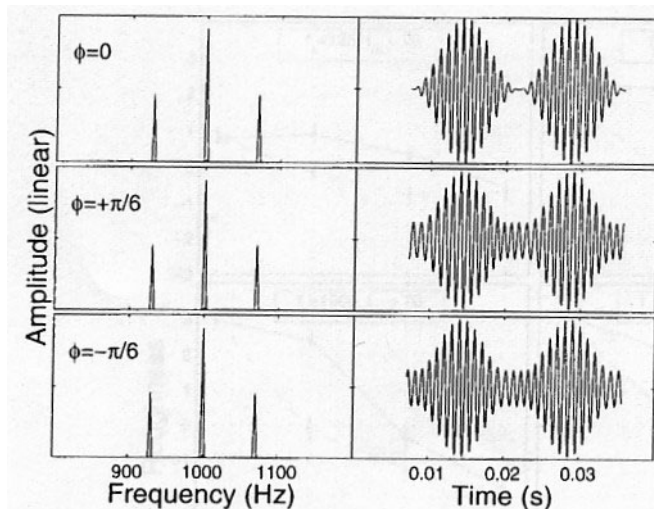
Die Studie beschränkt sich auf einen einzigen Typ von Amplitudenspektren. Die räumliche Klassifizierung ist daher mit Vorsicht zu geniessen. Amplituden- und Phaseneffekte können meiner Ansicht nach nicht in dieser Weise auseinanderdividiert werden [vgl. Kap. 7.7].

6.15. *Pressnitzer, McAdams (1999)*

Daniel Pressnitzer, Stephen McAdams, Two phase effects in roughness perception, JASA 105(5), 1999 [Pressnitzer et al. 1999]

Hinsichtlich der Frage, inwiefern die zeitliche Feinstruktur eines Perzeptes im Sinne von Kap. 6.12.1 durch das Gehör ausgewertet wird, wurden am IRCAM zwei psychoakustische Experimente durchgeführt, die eine reine Frequenztheorie der Rauigkeitsempfindung widerlegen. [Pressnitzer et al. 1999]

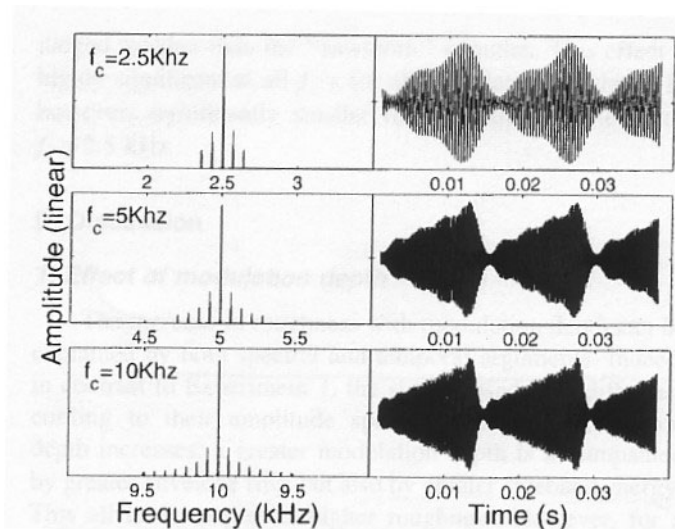
Ausgehend von einem amplitudenmodulierten Signal, das aus den drei Frequenzen $f_c - f_m$, f_c , $f_c + f_m$ (alle in Cosinuslage) besteht, wird die Nullphase des Trägertons f_c verändert. Solche Stimuli nennen die Autoren pseudo-amplitudenmodulierte Töne (pAM).



pAM-Testtöne für Phasenversuch mit konstanten Amplitudenverhältnis 1 : 2 : 1. Die Phasenverschiebungen um $\pm\phi$ ergeben jeweils die gleiche Hüllkurve, die Signalverläufe weisen aber eine unterschiedliche zeitliche Feinstruktur auf. [Quelle: Pressnitzer et al. 1999, 2774]

Im Experiment zeigte sich nicht nur eine unterschiedliche Rauigkeit in Abhängigkeit von der Phasenverschiebung ϕ , sondern auch unterschiedliche Rauigkeit bei gleicher Phasenverschiebung aber umgekehrtem Vorzeichen. Da in diesem Fall die Hüllkurven dieselben sind, folgt, dass dieser Unterschied nicht allein mit einer Auswertung der Hüllkurvengestalt erklärt werden kann.

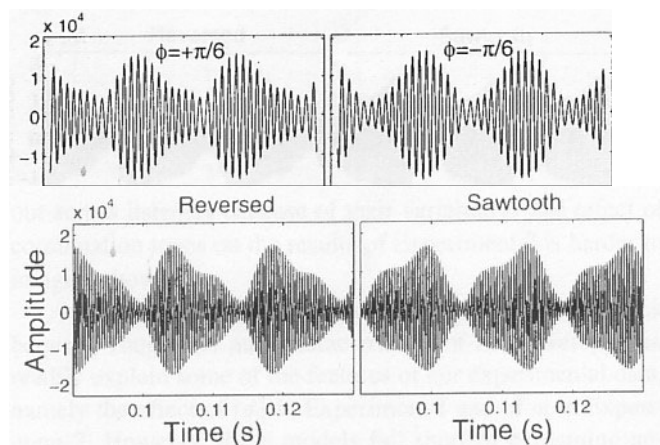
In einem zweiten Versuch wurden Cosinusschwingung mit sägezahnartigen – zeitlich asymmetrischen – Schwingungen moduliert:



Die sägezahnmodulierten Töne haben in ihrem Amplitudenspektrum mehrere Seitenfrequenzen, die ähnlich wie bei den gewöhnlichen frequenzmodulierten FM-Signalen, äquidistant um die Trägerfrequenz f_c verteilt sind. Da in der Fourierapproximation der Sägezahnschwingung nur einige wenige Teiltöne berücksichtigt werden, treten auch nur endlich viele Sinuskomponenten auf. Die angenäherte Sägezahnform ist in der Hüllkurve der Signale zu erkennen. [Quelle: Pressnitzer et al. 1999, 2778]

Durch Veränderungen aller Teiltonphasen der Sägezahnschwingung um $\pi/2$ kann die Signalgestalt in ihre Krebsform verwandelt werden. Die Hüllkurve erhält dadurch einen steilen Flankenanstieg und ein flaches Zurückgehen. Die Krebsgestalt weist eine signifikant höhere Rauigkeit auf als die Grundgestalt.

Ein Erklärungsansatz bezieht sich auf ein auditives Filtermodell nach Giguère, Woodland (1994). Im ersten Fall der pAM-Töne wird gezeigt, dass sich nach Anwendung des Filters, das mittlere und untere Signal in ihrer Hüllkurve durch unterschiedliche Modulationstiefe unterscheiden, und im zweiten Fall der Sägezahnmodulation bleibt die zeitliche Asymmetrie auch nach Anwendung des Filters bestehen.



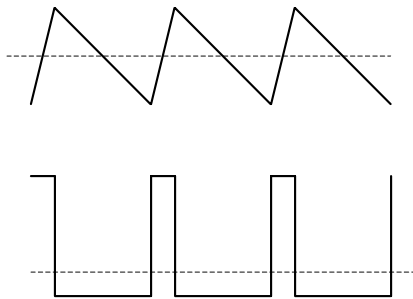
„Innere zeitliche Repräsentation“ der Stimuli nach Anwendung des auditiven Filters. Oben: Beim pAM-moduliertem Signal ergibt sich bei positiver Phasenverschiebung eine grössere Modulationstiefe als bei negativer Phasenverschiebung um den gleichen Betrag. Die Hüllkurve wurde durch den Filter also unterschiedlich moduliert. Unten: Auch nach der Filterung des sägezahnmodulierten Tons ist die Krebsbeziehung zwischen den beiden Hüllkurven noch erkennbar. [Quelle: Pressnitzer et al. 1999, 2777, 2778]

Die sägezahnmodulierten Töne widerlegen also die Vermutung Hermanns (1896), dass die Krebsgestalt stationärer Klänge, wie er sie durch Wechsel der Drehrichtung am Phonographen zu erreichen versuchte, von der ursprünglichen Darbietung ununterscheidbar sei, zumindest in

dem Fall, wo die Teiltonfrequenzen in gleiche kritische Bänder fallen. Die Sägezahn­näherung wurde von den Autoren bewusst so eingeschränkt, um zu verhindern, dass neben den Primärtönen entferntere Teiltöne zu einer eigenen Tonhöhenempfindung führen.

Diese Untersuchung ist ein starkes Indiz für eine temporale Auswertung der Signalverläufe, die nicht mit einem einzigen Parameter eingefangen werden kann. Es stellt sich damit die Frage ob Versuche wie Nitsche [1978], der durch elementar geometrische Kriterien (Kurvendiskussion), die offensichtlich fehlschlagen müssen, wenn sie auf das Schallsignal als Ganzes angewendet werden, durch ihre Einschränkung auf Ton-Perzepte im Sinne von 6.12.1, das heisst auf ausgefilterte Signale mit beschränkter Bandbreite durchaus zu brauchbaren Ergebnissen führen könnten, sei es in Bezug auf Hüllkurven solcher Teilsignale oder auch auf die Feinstruktur des Schalldruckverlaufs.

Die Detektion der steilen Flanke in der Hüllkurve äussert sich in der Ableitung als kurzer aber starker peak.



Dreiecksschwingungen werden bei der Differenziation zu Rechtecksschwingungen. Steile Flanken werden zu starken Impulsen.

7. Klangfarbenräume

Die vielzitierte Schlusspassage in Schönbergs Harmonielehre [1911] formuliert in visionärer Weise den Wunsch nach einer Theorie der Klangräume, in denen, mit Klangfarben melodieartige Strukturen mit vergleichbarer Wirkung komponiert werden können. Zur Emanzipationsforderung für Dissonanzen und Quartschichtungsklänge gesellt sich also bei Schönberg diejenige für die Klangfarbe als Strukturparameter. Im Lichte seines Dimensions- und Raumbegriffs erscheint Schönbergs Begriff der *Klangfarbenmelodie* als Kondensat seines räumlichen Musikverständnisses, logisch stringent und nicht als abgehobene Fantasie, allerdings verwendet er den Begriff der Klangfarbe in zweifacher Bedeutung. Es ist zu fragen, in wie weit in den durch multidimensionale Skalierung gewonnenen *timbre spaces* und mit modernen Klangtechniken Schönbergs Theorieforderung entsprochen wird. Rückblickend ist zu fragen, wodurch sich Schönbergs Theorieforderung von Berlioz' Ruf nach einer Theorie der Instrumentation unterscheidet? [Kap. [7.1](#)]

Matthias Hauer ist vor allem in Zusammenhang mit der Urheberschaft der Zwölftontechnik bekannt geworden. Sein Klangfarbenverständnis läuft auf einen eindimensionalen zyklischen Klangfarbenstruktur auf Basis der Gestalt des Intensitätenspektrums hinaus. Lassen sich darin Schönbergs Klangfarbenmelodien verwirklichen? [Kap. [7.2](#)]

Handschins Dimensionsbegriff ist derjenige der modernen Mathematik. Er überträgt die geometrische Raumvorstellung, wie sie sich bei Farben aus ihrer *rgb*-Darstellung oder bei ihrer Beschreibung durch Helmholtz-Koordinaten ergeben, auf die Klangfarbe und betont ihre Multidimensionalität zu einer Zeit, in der das Schlagwort der Klangfarbe als *multidimensional dimension* noch nicht im Umlauf ist. Trotz seiner intensiven Beschäftigung mit Optik, Akustik und mit Korrespondenztheorien hat Helmholtz nie eine räumliche Deutung der Klangfarbe in Erwägung gezogen. [Kap. [7.4](#)]

Bereits bei Mersenne und Rousseau werden klangcharakterisierende Adjektive in Gegensatzpaaren angeordnet. Die psychologische Betrachtungsweise stellt dem Merkmalsräume zur Seite, in denen derartige Adjektivpaare auf Polaritätsachsen abgebildet werden. Es stellt sich dabei die Frage, ob diese Polaritäten von einander unabhängig sind, das heisst, ob die Merkmale unabhängig von einander variiert werden können. Bei fünf solchen Adjektivpaaren zum Beispiel ergibt sich, wenn dies der Fall ist, eine fünfdimensionale Struktur. Andernfalls, falls Abhängigkeiten bestehen, versucht man unter den Achsen eine maximale Anzahl unabhängiger Merkmale zu ermitteln.

Sind die zugehörigen geometrischen Raumverhältnisse kompositorisch nutzbar? Sind sie interindividuelle Invarianten oder gar Universalien, die ähnlich den Tonhöhenrelationen bewusst gemacht werden können und deren Kenntnis den Kunstgenuss zu steigern vermag, oder können mit diesbezüglichen Techniken Wirkung hervorgerufen werden, deren Geheimnis bei den KomponistInnen bleiben soll? Sind sie gar nur individuelle Ordnungssysteme ohne Bedeutung für die Zuhörerschaft?

Allein auf Grund einer Analyse des Sprachgebrauchs von Versuchspersonen, also ohne zugehörige psychoakustische Experimente versucht Wolfgang Thies eine redundanzfreie sprachliche Basis der Klangattribute, eine Typologie des Klanges, zu definieren [Thies 1982]. Die Hauptfrage an die Psychoakustik in diesem Zusammenhang heisst, *Wie können die Achsen einer psychologischen Typologie auf physikalische Merkmale des Schalls bezogen werden?* Auf welche Weise sind die psychologischen Ordnungsstrukturen mathematisch-physikalisch interpretierbar?

Die Zahl unabhängiger Polaritätsachsen, die sich aus der Faktoranalyse von Thies ergeben, ist höher als die Dimensionszahl der üblichen *timbre spaces*, die durch psychoakustische

Versuche und multidimensionale Skalierung gewonnen werden [vgl. Kap. 7.4]. Für die Psychoakustik bedeutet dies, entweder nachzuweisen, dass die Testklänge eine genügend grosse Variabilität in allen Merkmalen aufweisen, die psychologischen Polaritätsachsen in Wirklichkeit also in einem Raum mit tieferer Dimension liegen, oder aber neue Testklänge beizuziehen, die der höheren psychologischen Dimension gerecht werden. Eine dritte Möglichkeit besteht darin, das statische Dimensionskonzept der Klangfarbe zu überdenken!

Wie McAdams im Gespräch äusserte, sind bei den TeilnehmerInnen, wenn man sie individuell auf ihre räumliche Klangbeurteilung hin beurteilt, selten Klangfarbenräume der Dimension grösser als zwei maximal drei nachzuweisen. Eine solche Dimensionszahl könnte als Indikator für klangfarbendifferenzierende Musikalität diene. Eine ebenfalls von McAdams angesprochene Frage betrifft den Vergleich interindividueller Klangfarbenräume aus verschiedenen Versuchen. Angenommen zwei unabhängige Versuche liefern je Klangfarbenräume der Dimension drei und zwei der Dimensionen lassen sich in beiden Räumen nachweisen, aber nicht die dritte. Bedeutet dies, die Klangfarbenempfindung ist in Wahrheit vierdimensional, oder ist sie dreidimensional und die dritte Dimension variiert kontextgebunden? [Mc Adams im Gespräch, Jan. 2001]

Das statische Konzept der *timbre spaces* impliziert eine geometrische Deutung des ursprünglich Qualitativen und läuft Gefahr, eine normative Vermessung des Unmessbaren zu konstatieren. Bei einer vollkommenen Vermessung des Qualitativen, könnte der zu vermessende qualitative Aspekt durchaus abhanden kommen, das Diktum *dissolution de la notion du timbre* [Chion, 1986] ist als Ausdruck solcher Befürchtungen ernst zu nehmen. In Ergänzung zu einem statischen geometrischen Konzept entwirft Leirdahl ein Verfahren der Klangfarbenanalyse, das geometrische Verortungen mit hierarchischen Strukturelementen kombiniert. Er untersucht zu diesem Zweck zwei Typen von Baumstrukturen, die eine statische Gliederung (*grouping structure*) und die lokalen zeitlichen Vorwärts- und Rückwärtsbeziehungen der Töne einer Klangfarbenmelodie (*prolongation tree*) zum Ausdruck bringen. Er überträgt zu diesem Zweck die zwischentonlichen Ordnungskonzepte Skalen, Konsonanz/Dissonanz-Polarität auf synthetische Töne gleicher Lautstärke und Tonhöhe [Kap. 7.6]. Der allfällige Erfolg eines solchen Vorgehens – im geistigen Umfeld der *minimal music* geäussert – erhärtet die Vermutung, dass die Dimensionalität und die Ordnungsstrukturen der Klangempfindungen nicht nur individuell, sondern auch nach Art der rezipierten Musik stark variieren. Ganz ähnlich dürfte unter klinischen Bedingungen auch eine Geometrie der Phasenbeziehungen konsistent erfahrbare und erlernbar sein [vgl. Kap. 7.7]. Der Vorteil an Leirdahls Ansatz ist, dass er eine klare Trennung zwischen dem Kompositionsmaterial und den darauf aufbauenden Bedeutungsstrukturen macht. Der gleiche Ansatz wurde von Leirdahl und Jackendorf [1983] für die klassische tonale Musiksyntax als eine *generative Theorie der Musik* vorgeschlagen.

Seit je wurden Musikinstrumente klassifiziert und solche hierarchische Einteilungen werden im täglichen Musikerleben eines an klassischer Musik orientierten Publikums ständig reproduziert: *dieser unangenehme aber kristallklare, vibratofreie Violinton über einem schlecht intonierenden Horn in der Unterterz! ...*

Für die ordnende Konservierung unserer Begriffe, Objekte und ihren Beziehungen wurden in der Informatik verschiedene Typen von Datenbanken zur Modellierung und Archivierung der Welt eingeführt. Eine hierarchische Datenbank erlaubt die Einordnung der zu klassifizierenden Objekte unter einem einzigen hierarchischen Gesichtspunkt. Auf Dokumente kann im Computer über ein solches hierarchisches Ordnungsschema (wie es der Suchpfad oder der Windows-Explorer darstellt) zugegriffen werden. Das relationale Modell

dagegen erlaubt es mehrere sich durchkreuzende „verschieden gefärbte“ hierarchische Strukturen abzubilden. Unter diesem Paradigma liessen sich adaptiv je nach lokalem musikalischen Kontext oder kompositionsgeschichtlichem Umfeld andere Strukturierungen vornehmen.

Das objektorientierte Modell verallgemeinert den relationalen Ansatz. Es kennt neben dem Konzept der *Vererbung* – die Violine erbt die allgemeinen Merkmale der Geigenfamilie, es stehen ihr Spieltechniken wie Flageolett-Doppelgriffe zur Verfügung, die den Kontrabässen verwehrt sind, die Geigenfamilie erbt von den Instrumenten mit beeinflussbarer Spektraldynamik – auch dasjenige des *dynamischen Verhaltens* (*Methoden* eines Objekts oder eines Objekttyps). Verschiedene Spieltechniken könnten beispielsweise als Methode, des betreffenden Musikinstrumenten-Objekts aufgerufen werden. Meier et al. (2000) erklären das objektorientierte Datenbankmodell an Beispielen aus der Musikwelt. Derartige Systeme könnten in Zukunft durchaus einen kreativen Umgang mit dem virtuellen Klangkosmos ermöglichen.

Über Internet verfügbare relationale Klangdatenbanken werden zur Zeit an verschiedenen Orten aufgebaut [so am IRCAM<<http://www.ircam.fr/>> und von Greg Sandell <<http://www.parmly.luc.edu/sandell/sharc/SHARC.homepage.html>> (flüchtige Adresse)]. Mazzola [1990] skizziert eine hierarchische Klassifizierung von FM-synthetisierten Klänge auf Basis der Vernüpfungsbeziehungen der FM-Bausteine, die neben den klassischen Instrument-Imitationen auch spezifisch synthetische Klänge erfassen soll. Das Verfahren orientiert sich an der elektroakustischen Genese und nicht an primär psychoakustischen Vorgaben. Die mathematische Eindeutigkeit der FM-Synthese ist ohne weitere Einschränkungen nicht gewährleistet, dies bedeutet für eine allfällige korrespondierende FM-Analyse eine Schwierigkeit [Kap. 7.5.1]. Der Ansatz könnte aber, wenn er mit dem Paradigma der Bandpassfilterbank verglichen wird [vgl. Einleitung zu Kap. 8.4] durchaus erfolgversprechend sein. Die Methode von Chownig [1973] gestattet jedenfalls mit wenigen elektroakustischen Instrumentalparametern, eine Vielzahl – im Vergleich zur additiven Fouriersynthese – lebhafter Klänge zu erzeugen und stellt einen gewaltigen Fortschritt im Bereich der elektro-akustischen Musikinstrumente dar [Kap. 7.5].

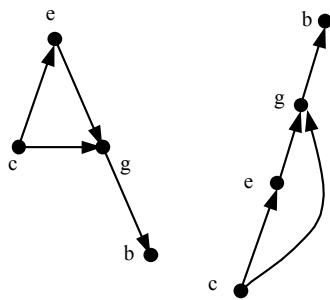
7.1. Schönberg: Dimension und Klangfarbenmelodien

Die Klanghöhe ist nichts anderes als Klangfarbe, gemessen in einer Richtung.

In Zusammenhang mit dem Terzschichtungsprinzip der Akkordlehre bringt Schönberg den Begriff der Dimension wie folgt ins Spiel:

Als ob das System just auf Terzen aufgebaut sein müßte! Warum nicht auf Quinten, die ja näher liegen als Terzen? Warum überhaupt „auf“gebaut? Vielleicht haben die Klänge auch drei Dimensionen, vielleicht sogar mehr! [Schönberg, Harmonielehre 1966, 388]

Klang ist hier in erster Linie als Zusammenklang, Akkord zu verstehen. Akkorde werden in Terzschritten, die in gleiche Richtung weisen, durchschritten, das heisst sie werden aus Tönen die in einer Dimension liegen, gebildet. Terzen werden dabei unabhängig von ihrer tatsächlichen Grösse in Halbtönen als gleichwertig angesehen. Akkorde könnten aber auch aus Quinten aufgebaut sein, zumal Quinten *näher* als Terzen liegen. Wenn die Quinte näher als die Terzen liegt, heisst dies, dass der Doppelschritt aus kleiner und grosser Terz zur Quinte erst recht ein Umweg ist und dass kleine und grosse Terzen gar nicht in gleiche Richtung weisen können, wenn man eine klassische Geometrie in der Ebene zu Grunde legt, wo es zwischen zwei Punkten nur eine kürzeste Verbindung, die zugleich die geradlinige ist, gibt.



Geometrische Deutung des Dominantseptakkords in der Ebene. Wenn die Quinte näher als die Terz liegt, müssen im Dreieck *ceg* links, die Seiten *ce* und *eg* beide länger als *cg* sein. Die gewählte Darstellung der Akkorde als Teilmenge eines nicht rechtwinkligen Gitters entspricht der Darstellung von Jonquiére-Eitz [vgl. v. Oettingen 1866, 10]. Eine rechtwinklige Veranschaulichung der Tonigkeiten findet sich erstmals bei Rameau [1726] und später bei Euler [1737]. Weist man wie in der rechten Figur den kleinen und grossen Terzen eine gemeinsame Raumrichtung, die „Terzschichtungsrichtung“, zu, so müsste eine direkte Verbindung *cg* existieren, die kürzer als die geradlinige Verbindung *ceg* ist, wenn die grössere Nähe der Quinte topologisch zum Ausdruck kommen soll.

Die grössere Nähe der Quinte ergibt sich bei Schönberg so: Die Quinte ist der erste Ton in der Obertonreihe mit vom Grundton verschiedener Tonigkeit. Die Obertonreihe fungiert also als versteckter Ordnungsraster der Akkordbildung. Insofern könnte, da zwischen Akkord und Ton klanglich nur ein gradueller Unterschied zu bestehen scheint, die obige Dimensionsbetrachtung auf den durch eine Note repräsentierten Klang, auf den Ton selbst, übertragen werden, und Schönbergs Frage verwandelt sich in diejenige nach der Mehrdimensionalität des Tons. In diesem Sinn wird der Dimensionsbegriff am Ende der Harmonielehre im Anschluss an die Besprechung der sechs- und mehrtönigen Klänge verwendet:

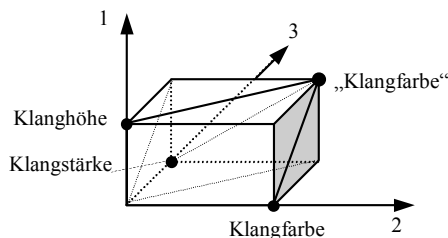
Am Klang werden drei Eigenschaften erkannt: seine Höhe, Farbe und Stärke. Gemessen wurde er bisher nur in einer der drei Dimensionen, in denen er sich ausdehnt. In der, die wir Tonhöhe nennen. Messungsversuche in den andern Dimensionen wurden bisher kaum unternommen, ihre Ergebnisse in ein System zu ordnen, noch gar nicht versucht. Die Bewertung der Klangfarbe, der zweiten Dimension des Tons, befindet sich also in einem noch viel unbebauten, ungeordneten Zustand als die ästhetische Wertung dieser letztgenannten Harmonien. Trotzdem wagt man unentwegt, die Klänge bloß nach dem Gefühl aneinanderzureihen und gegenüberzustellen, und noch nie ist es jemandem eingefallen, hier von einer Theorie zu fordern, daß sie die Gesetze, nach denen man das tun darf, feststelle. Man vermag es eben vorläufig nicht. Und wie man sieht, geht es auch ohne das. Vielleicht würden wir noch genauer differenzieren, wenn Messungsversuche in dieser zweiten Dimension bereits ein greifbares Resultat erzielt hätten. Vielleicht auch nicht. Jedenfalls wird unsere Aufmerksamkeit auf die Klangfarben immer reger, die Möglichkeit, sie zu beschreiben und zu ordnen, immer näher gerückt. [Schönberg, Harmonielehre 1966, 503]

Die Begriffe *Eigenschaften* und *Dimension* werden fast synonym eingeführt („drei Eigenschaften“ – „drei Dimensionen“), die weitere Anwendung jedoch wertet die geometrischen Konnotationen der Dimension aus. Der Klang soll nicht nur in seiner Höhe vermessen werden, sondern vor allem auch in seiner zweiten Dimension, der Klangfarbe. Dadurch sollte es möglich werden, Gesetze des Klangübergangs, eine Syntax der Klangfarben, aufzustellen. Die Klangfarbe wird dadurch zu einem zur Tonhöhe gleichberechtigten Kompositionsparameter erhoben. Auch für sie wäre eine Handwerkslehre zu fordern.

In der anschliessenden Passage hinterfragt Schönberg den Unterschied zwischen den ersten beiden Dimensionen *Höhe* und *Farbe*:

Ich kann den Unterschied zwischen Klangfarbe und Klanghöhe, wie er gewöhnlich ausgedrückt wird, nicht so unbedingt zugeben. Ich finde, der Ton macht sich bemerkbar durch die Klangfarbe, deren eine Dimension die Klanghöhe ist. Die Klangfarbe ist also das große Gebiet, ein Bezirk davon die Klanghöhe. Die Klanghöhe ist nichts anderes als Klangfarbe, gemessen in einer Richtung. [Schönberg, Harmonielehre 1966, 503]

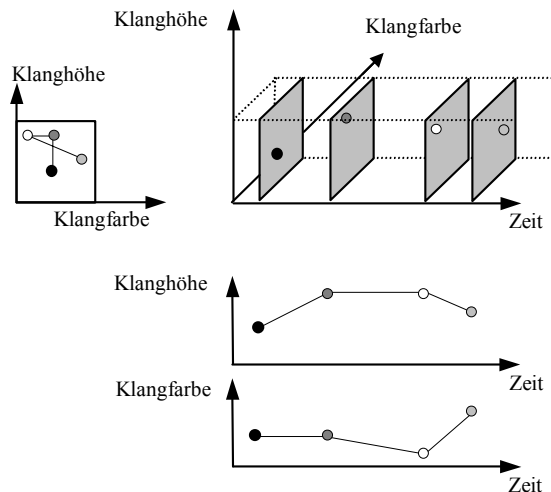
Klangfarbe ist also, als Summe aller Bestimmungsmerkmale des Klangs, ein Oberbegriff der Klanghöhe. Die Höhe ist Projektion der Klangfarbe auf die Tonhöhenachse. Schönberg verwendet damit den Klangfarbenbegriff in zweierlei Bedeutungen. In Anlehnung an seine eigene Formulierung ergibt sich „Klangfarbe ist nichts anderes als Klangfarbe, gemessen in einer Richtung“, wenn die erste Dimension, die Höhe, durch die zweite Dimension, die Farbe, ersetzt wird.



„Klangfarbe“ als Oberbegriff von Klanghöhe, Klangfarbe und Klangstärke.

Ist es nun möglich, aus Klangfarben, die sich der Höhe nach unterscheiden, Gebilde entstehen zu lassen, die wir Melodien nennen, Folgen, deren Zusammenhang eine gedankenähnliche Wirkung hervorrufen [1911: hervorrufen], dann muß es auch möglich sein, aus den Klangfarben der anderen Dimension, aus dem was wir schlechtweg Klangfarbe nennen, solche Folgen herzustellen, deren Beziehung untereinander mit einer Art Logik wirkt, ganz äquivalent jener Logik, die uns bei der Melodie der Klanghöhen genügt. [Schönberg, Harmonielehre 1966, 503]

Eine Melodie im herkömmlichen Sinne ist der Spezialfall einer zeitlichen Abfolge von Klangfarben – in der allgemeineren Bedeutung –, bei der von der Klangfarbe in der gewöhnlichen Bedeutung abstrahiert wird, sei es, dass sie konstant ist oder dass sie keine Rolle spielt. Ebenso zieht Schönberg im hier geäußerten „traditionellen Melodieverständnis“ eine konstitutive Rolle von *Klangstärke* und *Tondauer* nicht in Betracht. Die Abfolge der Töne einer Melodie gehorcht einer inneren Logik, eine solche müsste auch bei einer Abfolge von Klangfarben im allgemeinen Sinn, von mehrdimensionalen Objekten, möglich sein:



Klangfarbenmelodien. Punktfolge im Raum Einsatzzeit-Klanghöhe-Klangfarbe und Projektionen. Der erste Schritt bedeutet eine Zunahme der Tonhöhe bei gleicher Klangfarbe, im zweiten verändert sich nur die Klangfarbe bei gleicher Tonhöhe, im dritten ändern sowohl Klangfarbe als auch Tonhöhe. Die Darstellung beruht auf einer eindimensionalen Repräsentation der Klangfarbe (im engeren Sinne).

Ganz am Ende der Harmonielehre fällt der Begriff der *Klangfarbemelodie*, als eine Zukunftsfantasie, die sich verwirklichen wird:

Das scheint eine Zukunftphantasie und ist es wahrscheinlich auch. Aber eine, von der ich fest glaube, daß sie sich verwirklichen wird. Von der ich fest glaube, daß sie die sinnlichen, geistigen und seelischen Genüsse, die die Kunst bietet, in unerhörter Weise zu steigern imstande ist. [...]

Klangfarbenmelodien! Welche feinen Sinn, die hier unterscheiden, welcher hochentwickelte Geist, der an so subtilen Dingen Vergnügen finden mag!

Wer wagt hier Theorie zu fordern! [Schönberg, Harmonielehre 1966, 503-504]

Nicht zu vergessen ist neben der geforderten Theorie auch eine zugehörige Technik, ein Instrumentarium, das über die Klangparameter ähnlich frei wie über die Tonhöhen zu verfügen erlaubt. Sind die Klänge erst in all ihren relevanten Dimensionen vermessenbar, vermessen und kartographiert, liegt der Wunsch ihrer Abrufbarkeit per Tastendruck, im Sinne von Berlioz' Metapher der Orchesterklaviatur auf der Hand.

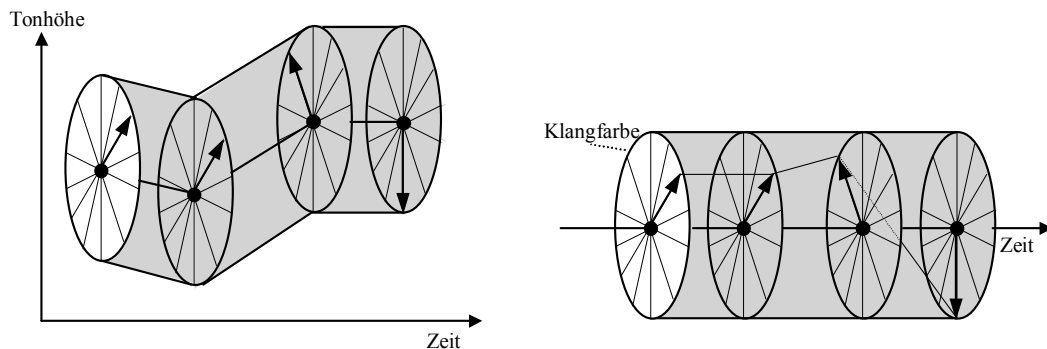
7.2. Farbkreis und Klangfarbe bei Josef Hauer

Das Wesentlichste jeder Klangfarbe läßt sich aus dem Intervall heraushören, das vom Grundtone und vom höchsten der stärker hervortretenden Obertöne einer Reihe gebildet wird. Jedes Intervall birgt den Kern einer Klangfarbe. Das Intervall gibt der Musik die Farbenwirkung. **Intervall = Farbe**. [Hauer 1918, 5]

Hauer geht von einem einzigen besonders deutlichen Oberton aus. Die Klangfarbe ist dabei durch das Intervall zwischen diesem „Formanten“ und dem Grundton bestimmt. Gleichgestaltige, geometrisch isomorphe Spektren zu verschiedener Grundfrequenz ergeben die gleiche Klangfarbe. Im Unterschied zur klassischen Formanttheorie entscheidet also nicht die absolute Frequenz des Formanten über die Klangfarbe, sondern ihr Intervall zum Grundton, und dieses ist bei harmonischen Spektren durch die Ordnungszahl der betreffenden Obertöne bestimmt. Ändert zwischen zwei verschieden hohen, nicht im Oktavabstand stehenden Tönen die Frequenz der Formanten nicht – wie bei gleichen Vokalen auf verschiedener Tonhöhe –, so ändert gemäss Hauers Verständnis die Klangfarbe sehr wohl.

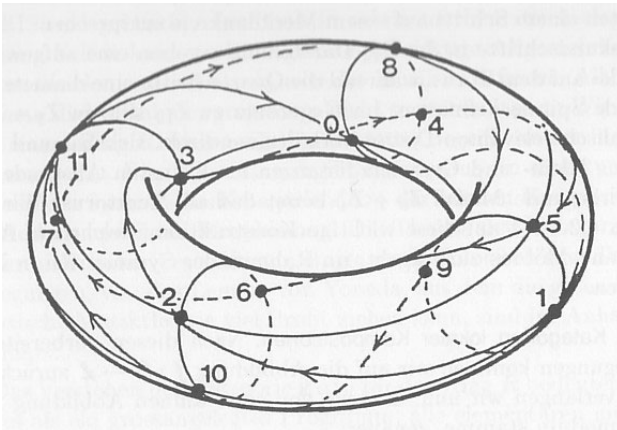
Hauers Auffassung widerspiegelt genau jenes Helmholtzverständnis, wonach die Klangfarbe durch die Gestalt des Amplitudenspektrums festgelegt sei und welches als *durch die Schumannschen Klanggesetze widerlegt* angesehen wird [Reinecke 1967, 458-459]. Der „Kern der Klangfarbe“, das Intervall zwischen Grundton und stärkstem Oberton klassifiziert die Klangfarbe eindimensional. Da, wie das folgende Zitat zeigt, Oktavreduktion die Klangfarbe in Hauers System invariant lässt, ist diese eine Dimension zyklisch zu denken:

Die musikalische Farbenlehre löst sich mithin restlos auf in die Lehre von den Intervallen. Die unendlich vielen Intervalle innerhalb einer Oktave (die andern sind ja nur Wiederholungen) bilden die **Farbentotalität** in der Musik. (Wir veranschaulichen uns das in den Zeichnungen. Man denke auch an einen Lichtfarbenkreis, in dem Gelb, Rot, Blau, Grün gleichmäßig ineinander übergehen.) [Hauer 1918, 6]



Klangfarbenmelodie bei Hauer. Die Klangfarbe ist durch das oktavreduzierte Intervall zwischen Tonhöhe und stärkstem Oberton bestimmt. Sie wird pro Ton durch einen Zeiger auf einem zwölfgeteilten Zifferblatt als lokale Koordinate (gebundener Vektor) symbolisiert. Links: Zwischen den ersten beiden Tönen bleibt die Klangfarbe konstant. Nur die Tonhöhe ändert. Im zweiten Schritt ändern Tonhöhe und Klangfarbe, im dritten ändert die Klangfarbe bei gleichbleibender Tonhöhe. Rechts: Abstrahiert man von der Tonhöhe kann die sich wandelnde Klangfarbe auf einem Zylinder versanschaulicht werden (sich ruckweise drehender Zeiger).

Hesse diskutiert in Zusammenhang mit der Oktavinvarianz zyklische und lineare Aspekte der Klangwahrnehmung [Hesse 1972; 1974]. Fleischer weist in seiner Dissertation zum Phaseneinfluss auf die Klangfarbe [Fleischer 1976] darauf hin, dass bei konstanten Amplituden schmalbandiger Dreitonkomplexe etwa zehn bis zwölf Stufen unterscheidbarer Phasenlagen möglich sind. Wenn man diese Kerbungsangabe nicht auf Amplitudenunterschiede (Verdoppelung der Lautheit) bezieht ergeben sich daraus in naheliegender Weise zyklische oder doppeltzyklische Klangfarbenstrukturen (Kreis bzw. Torus als zweidimensionale Verklebung zweier zyklischer Dimensionen), die diskreten Klangfarbenpunkte können dabei in ähnlicher Weise wie in Rucknick [1929], Mazzola [1990] angeordnet werden [vgl. Ebeling 1999, 95-97].



Terztorus [Quelle: Mazzola 1990, 105]. Unter der Vorstellung doppelt zyklischer Klangfarbendimensionen wären in der vorangehenden Darstellung die Zifferblätter durch derartige lokale Tori zu ersetzen.

7.3. Mehrdimensionalität von Farbe und Klangfarbe bei Handschin

Jacques Handschin (*Der Toncharakter*, 1948) nimmt eine strukturelle Ähnlichkeit zwischen Farbe und Klangfarbe an, die sich auf die Art bezieht, wie die beiden in einer bildlichen oder klingenden Komposition verwendet werden. Der Vergleich der Farben mit den Klangfarben führt in zur folgenden Dimensionsbetrachtung:

[...] wenn wir die Tonhöhengrade eindimensional, das heisst auf der geraden Linie, aufgetragen denken können, so braucht es bei den Farben ausser der einen Dimension, die die spezifische Helligkeit darstellt, ebenso viele Dimensionen, wie es Grundfarben sind; und bei den Klangfarben zerfließt die Zahl der Dimensionen völlig, da die Zahl der aufstellbaren Typen beliebig ist und man sich von jeder Klangfarbe aus in beliebig vielen Richtungen bewegen kann; allerdings fällt auch hier die Notwendigkeit einander durchkreuzender Dimensionen weg, da es sich nicht um die Sättigung oder Verdünnung innerhalb gegebener Typen handelt. [Handschin 1948, 381]

Die Vierdimensionalität der optischen Farben ergibt sich physiologisch aus den vier Typen Rezeptorzellen. Dabei verbindet sich die eigentliche Farbinformation, die in den drei Arten von Zäpfchenzellen steckt, mit der Helligkeitsinformation der Stäbchenzellen zu einer vierdimensionalen Farbinformation, vergleichbar mit Farbformaten der Computergrafik, die neben dem *rgb*-Wert den so genannten alpha-Kanal einbeziehen (rot, grün, blau, α).

Wie die „sich durchkreuzenden Dimensionen“ zu verstehen sind, wird aus dem Kontext der Textpassage nicht ganz klar, möglicherweise denkt Handschin an die nicht redundanzfreie Darstellung durch vier Kennzahlen. Oder aber, da er die Helmholtz'schen Begriffe *Helligkeit* und *Sättigung* verwendet, an das zyklische Element, das sich ergibt, wenn man entlang der maximal gesättigten Farben, der Schuhsohle entlanggeht [vgl. Kap. 4.4.7].

Die Klangfarbe als multidimensionales Attribut, wie sie im folgenden Zitat zur Sprache kommt,

Bei dieser Entsprechung ist, wie wir sahen, das für uns wesentlichste, dass der Vieldimensionalität der Veränderung bei der Klangfarbe die Variabilität jedes Gliedes in der Teiltonreihe entspricht. [Handschin 1948, 384]

ist als diskretes, physikalisches Spektrums gleichwertig zu einem Punkt in einem Raum, dessen Dimensionszahl durch die Zahl der Teiltöne bestimmt ist. Diese Deutung stimmt

überein mit derjenigen der modernen Mathematik, wenn gesagt wird, die Sinusschwingungen bilden im Raum der periodischen Funktionen ein Orthogonalsystem, das als Koordinatensystem der Vermessung der Spektralvektoren dient. In der psychoakustischen Literatur wird, die Deutung der Klangfarbe als *multidimensional dimension* zumeist mit Licklider in Verbindung gebracht:

Until careful scientific work has been done on the subject, it can hardly be possible to say more about timbre than that it is a 'multidimensional' dimension. [Licklider 1951, 1019]

In den untersuchten Quellen wurde kein älterer Nachweis gefunden, der diese geometrische Deutung des Spektrums musikalisch thematisiert. Dies erstaunt um so mehr, da diese Sicht auf die musikalischen Objekte bei Descartes schon in greifbarer Nähe war [vgl. Kap. [2.3.3](#), Kap. [8.1](#)].

7.4. Multidimensionale Skalierung

Das mathematisch-statistische Verfahren der Multidimensionalen Skalierung (MDS= **M**ulti-**D**imensional **S**caling) ist ein in Psychologie und Soziologie häufig verwendetes Hilfsmittel zur Generierung höherdimensionaler Strukturen, die der Visualisierung und Deutung komplexer Sachverhalte dienen. Es basiert auf Ähnlichkeitsurteilen beim Paarvergleich. Zu einer vorgegebenen Stichprobe bestimmt das Verfahren auf Basis der Ähnlichkeitsmatrix die räumliche Anordnung und die optimale Dimensionszahl. Es sind also keine vorgängige Annahmen über die Dimension und die Bedeutung der Achsen des berechneten Merkmalsraums zu machen. Allerdings kann die Dimension von der Art und Grösse der Stichprobe – in ihrer Anwendung auf die Psychoakustik also von der Auswahl der Testklänge – abhängen. Die Dimensionszahl ist höchstens $n - 1$, wenn n die Grösse der Stichprobe ist (Die Punkte sind dann in *allgemeiner Lage*). Es stellt sich also immer die Frage nach der Repräsentativität der Stichprobe. Eine Vergrößerung der Stichprobe, die diese Frage klären könnte, hat ein schnelles Anwachsen der Anzahl vorzunehmender Paarvergleiche, nämlich $\binom{n}{2} = \frac{n \cdot (n-1)}{2}$, zur Folge. Wenn die Elemente in beiden Reihenfolgen dargeboten werden, ergeben sich $n^2 - n$ Paarvergleiche, wenn n die Grösse der Stichprobe ist. Bei 10 Klängen sind dies schon 45 beziehungsweise 90 Paarvergleiche. Dies alles ohne Berücksichtigung von Kontexteffekten! Noch schneller wächst die Zahl der Vergleiche, wenn in solchen Verfahren statt Paar-, Tripelvergleiche vorgenommen werden.

Wählbar ist die *Metrik*, die mathematische Vorschrift, die dazu dient, die Abstände zwischen je zwei Elementen des Merkmalsraums zu bestimmen. In der Regel wird die *euklidische Metrik* genommen, so dass die Abstände zwischen den Elementen des Merkmalsraums über den Satz von Pythagoras wie in unserem Lebensraum aus ihren Koordinaten bestimmt werden können:

$$d(x, y) = \sum_{i=1}^k (x_i - y_i)^2, \quad k = \text{Dimension des Merkmalsraums}$$

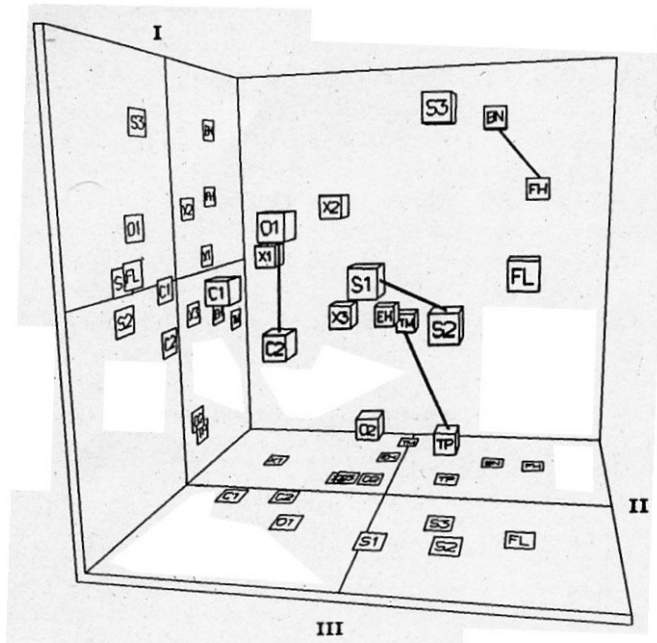
Bei Anwendungen der multidimensionalen Skalierung auf den Paarvergleich von Klangfarben ergeben sich in der Regel Dimensionszahlen, die kleiner als fünf sind. Es ist zu fragen, ob und wie die naheliegenden höherdimensionalen am Schallsignal orientierten Klassifizierungen damit zur Deckung gebracht werden könnten.

7.4.1. Grey

Als Beispiel für die Anwendung der MDS auf Instrumentalklänge sei hier der Ansatz von Grey [1975; 1977] und Grey et al. [1978] kurz vorgestellt.

Die Bestimmung der Dimension und der Klangfarbengeometrie auf Grund der Ähnlichkeitsurteile ist der mechanische Teil der Arbeit, der von Computerprogrammen bewerkstelligt werden kann (INSCAL).

Im nächsten Schritt wird ein Koordinatensystem, ein vollständiges System von paarweise orthogonalen Achsen, bestimmt. Es sind dabei so viele Koordinatenachsen zu bestimmen, wie die MDS als Dimensionszahl ermittelt hat. Die Wahl des orthogonalen Achsensystems und die Lage des Koordinatenursprungs ist willkürlich.



Klangfarbenraum [Grey et al. 1978, 1496]. Die räumliche Darstellung visualisiert durch Grösse der Kuben und Projektionen auf Seitenwand und Boden, die räumlichen Verhältnisse von 16 instrumentalen Klängen der gleichen Tonhöhe ($e_2' = 311$ Hz). Die verbundenen Klangfarben wurden in einem zweiten Versuch so modifiziert, dass die Amplituden ihrer gemeinsamen Teiltöne vertauscht wurden. Die Modifikation hat einen umordnenden Effekt in der vertikalen Richtung, was ihre Deutung als spektrale Dimension stützt. Die Abkürzungen bedeuten: O1 und O2 Oboen, C1 und C2 Klarinetten, X1, X2 und X3 Saxofone, EH und FH Englisch- und Französischhorn, TP Trompete, TM Posaune, FL Flöte, BN Fagott, S1, S2 und S3 Streichinstrumente.

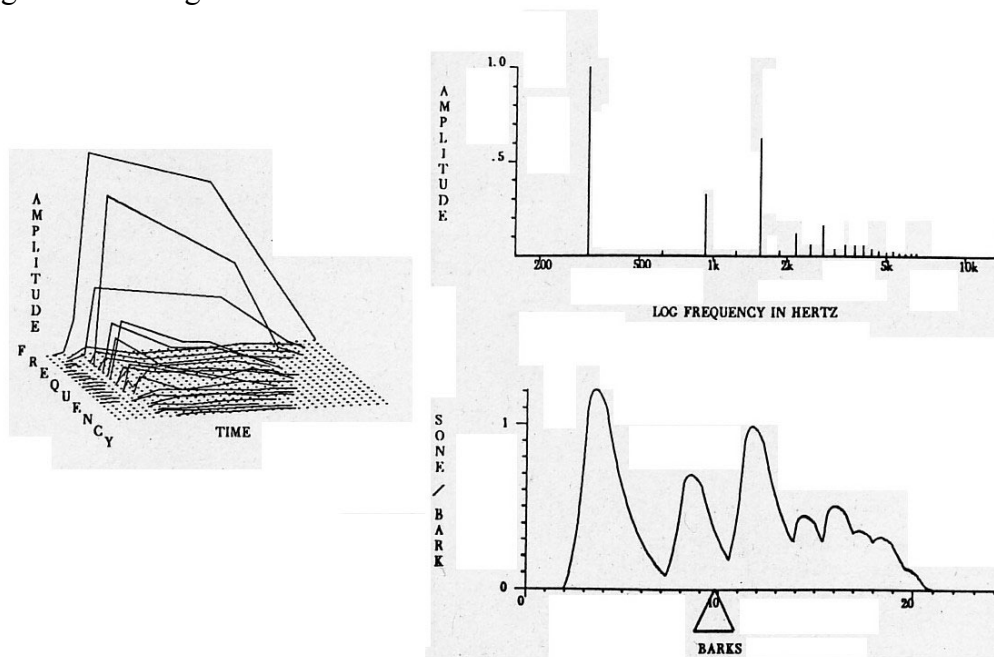
Es kann dabei wie folgt verfahren werden: Der maximale Durchmesser der Punktwolke stellt die erste Dimension dar. Unter allen dazu orthogonalen Richtungen wählt man den maximalen Durchmesser, dies ist die zweite Hauptachse. In einem dreidimensionalen Raum ist dadurch die dritte Achse bereits eindeutig bestimmt. In höherer Dimension fährt man in analoger Weise fort. Solche Systeme von Dimensionsachsen können ebenfalls vom Computerprogramm bestimmt werden. Möglicherweise gibt es aber mehrere Lösungen.

Im letzten und schwierigsten Schritt wird versucht, die Achsen physikalisch und psychologisch zu interpretieren. Die Polaritätsachse der ersten Dimension weist, wenn man wie beschrieben vorgeht, als psychologisches Merkmal die grösste Streuung auf und sollte am einfachsten physikalisch interpretiert werden können.

Definiert man versuchsweise – zur Modellierung der Helligkeit – den Schwerpunkt des Frequenzspektrums (in logarithmischer Darstellung) als eine *physikalische* Kenngrösse, so

können die Testklänge nach diesem Kriterium physikalisch geordnet werden. Gibt es im psychologischen Klangfarbenraum, der von der MDS gefunden wurde, eine Raumrichtung, auf der die „Klangfarbenpunkte“ der Testklänge die gleiche Reihenfolge haben, so sagt man, die physikalische Kenngrösse sei mit dieser Raumrichtung *korreliert*. Eine vollständige physikalische Deutung des Klangfarbenraums liegt dann vor, wenn alle psychologischen Raumrichtungen auf diese Weise physikalisch interpretiert sind. Findet man für die psychologischen Polaritätsachsen zudem geeignete verbale Klangattribute, gilt die räumliche Deutung der Stichprobe als gelungen. Darüber hinaus sollten sich, wenn die gefundene Raumstruktur konsistent ist, andere nicht erfasste Klangfarben richtig in die bestehende Ordnungsstruktur einfügen. Der Aufsatz von Grey, Gordon [Grey et al. 1978] untersucht zu diesen Zweck den Effekt einer paarweisen Modifikation der Klangspektren, bei der die Amplituden gemeinsamer spektraler Komponenten ausgetauscht werden. Die Modifikationen äussern sich in der ersten Dimension des Klangfarbenraums in Form der erwarteten Umordnung. Mehr als drei Dimensionen sind – so lautet das Ergebnis des MDS-Algorithmus – der Stichprobe nicht adäquat.

Da für musikalische Klänge weit mehr als drei von einander unabhängige physikalische Kennzahlen definiert werden können, ist die Zuweisung aus Sicht der physikalischen Merkmale eine Projektion auf eine tieferdimensionale Struktur, dass heisst beim Übergang der physikalischen zur psychologischen Darstellung werden in klassifizierender Weise nicht alle Informationen verarbeitet. Es ist sogar theoretisch möglich, dass es verschiedene physikalisch nicht gleichwertige Interpretationen des gleichen psychologischen Klangfarbenraums gibt.



Deutung der spektralen Dimension im Klangfarbenraum. Die linke Zeichnung stellt die zeitliche Entwicklung der Teiltöne eines synthetischen Instrumentaltons als Landschaft dar. Die gezeichneten Amplitudenverläufe sind linearisierte Verläufe eines vermessenen gewöhnlichen Instrumentaltons. Die Zeichnung rechts oben ordnet der Landschaft ein stationäres Amplitudenspektrum (zeitlicher Mittelwert je Teilton) zu. Das Nadelspektrum ist in der Figur rechts unten nach dem Lautstärke-Modell von Zwicker/Scharf [1965] in ein kontinuierliches Spektrum verwandelt worden. Diese Transformation berücksichtigt die frequenzabhängige Lautheitsempfindung und die Frequenzauflösung der Basilarmembran. Der mit dem Dreieck markierte Punkt auf der Barks-Achse ist der Schwerpunkt der Spektralverteilung des Ohrspektrums. Dieser dient Grey, Gordon als psychoakustische Kenngrösse, die gut mit der ersten, vertikalen Dimension des Klangfarbenraums der vorangehenden Abbildung korreliert. [Quelle: Grey et al. 1978, 1497]

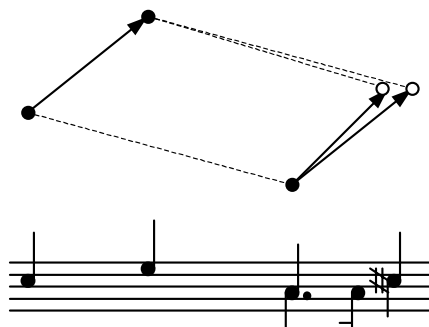
Die Abfolge bei der Bestimmung der ersten psychoakustischen Kennzahl des Klangfarbenraums von Grey besteht zusammengefasst aus den folgenden Schritten.

- Bestimmung des zeitvarianten Spektrums der Teiltöne (Landschaft)
- Projektion auf ein *diskretes* statisches Nadelspektrum (Paarfolge (f_i, a_i))
- Transformation in ein *kontinuierliches* „Ohrspektrum“ in den psychoakustischen Koordinaten *Son* und *Bark* (*Son* ist ein gegenüber *Phon* verbessertes Lautheitsmass, zwischen *Phon* und *Son* besteht ein logarithmischer Zusammenhang, wie zwischen der Intensität in *Watt* und *Dezibel*; *Bark* misst die frequenzabhängige kritische Bandbreite).
- Berechnung der psychoakustischen Kenngrösse aus dem Ohrspektrum.

Die Ermittlung des Nadelspektrums im zweiten Schritt, kann auch als Übergang von einem Klang mit Spektraldynamik in einen stationären quasi-periodischen Klang aufgefasst werden. Daraus ergibt sich, dass quasi-periodische Klänge im Klangfarbenraum von Grey auf gleicher Höhe wie die ihnen entsprechenden modulierenden Klänge liegen müssten, wenn die Deutung der ersten Achse korrekt ist. (Die beiden andern Koordinaten dürfen dabei variieren.) Zur Transformation in das kontinuierliche Ohrspektrum (in den Anregungszustand der Basilarmembran) ist anzumerken, dass verschiedene Nadelspektren, den gleichen Kurvenverlauf ergeben können. Man könnte beispielsweise zusätzliche Frequenzkomponenten einfügen, die von den ursprünglichen verdeckt werden. Der Klang eines derartig angereicherten Spektrums müsste, falls die ganze vom Gehör verarbeitete Information im Ohrspektrum steckt, ununterscheidbar vom Ausgangsklang sein. Schallereignisse mit gleichem Ohrspektrum (resp. identischer Ohr-Spektraldynamik) wären also ununterscheidbar, ähnlich wie Farben mit verschiedenem Frequenzspektrum aber gleichen *rgb*-Werten.

7.4.2. Parallelogrammbeziehungen im Klangfarbenraum

McAdams et al. [1992], konfrontierten ihre Versuchspersonen mit einer Folge von drei Töne *a*, *b*, *c* und forderten sie auf, unter zwei weiteren Tönen d_1 und d_2 zu entscheiden, welcher sich zu *c* so verhalte wie *b* zu *a*. Im Kontext Tonhöhen Einsatzzeit entspricht dem die Frage nach einer realen Sequenz eines Zweitonpaars, im Falle der Töne gleicher Lautstärke und gleicher Tonhöhe testeten die Autoren die Hauptdimensionen bekannter psychoakustischer *timbre spaces*:



Klangfarbenanalogien. Auf Tonhöhen Einsatzzeit übertragen ist zu entscheiden, welche der in Stimmen notierten rhythmischen Varianten die korrekte Sequenz darstellt.

Offenbar können in der Klangfarbenebene Schärfe, Spektraldynamik oder sogar in einer dreidimensionalen Situation Schärfe, Spektraldynamik, Anschlagsqualität derartige Parallelogrammbeziehungen erlernt werden. Auf die klassischen Parameter übertragen

entspräche die dritte Dimension einer zusätzlichen Bewertung der Dynamikunterschiede (z.B. $mf - f$, $pp - mp$ oder p ?). Die Verwendung derartiger Kompositionstechniken ist meines Erachtens nur unter einer groben Diskretisierung des Klangmaterials, wie sie Lehrdahl [1987] mit seinem Prototypbegriff vorschlägt [Kap. 7.6], praktikabel und werden ihrer Zweckbestimmung angenehme Wirkungen hervorzurufen, wohl nur lokal innerhalb kurzer Zeitabschnitte oder als Signaleffekte nachkommen können. Der Begriff der Klangfarbenmelodie wird durch solche Klangfarbenmikromotivik konkretisiert.

7.4.3. Dimensionsbetrachtung

Betrachtet man periodische Klänge, so gehören zu jeder Sinustonkomponente zwei Kennzahlen, die Amplitude und die Nullphase, also zwei reelle Zahlen oder eine komplexe Zahl. Ein periodischer Klang besteht aus maximal f_{max}/f_{min} hörbaren Teiltönen also höchstens $20000/20 = 1000$ Obertönen. Ein periodischer Klang mit tausend Teiltönen könnte also als Punkt in einem 1000-dimensionalen komplexen oder einem 2000-dimensionalen reellen Vektorraum angesehen werden. In einem solchen Raum bilden die Sinus- und Cosinusschwingungen in mathematisch kanonischer Weise ein (vollständiges) rechtwinkliges Koordinatensystem. Dies bedeutet, dass in einem solchen Raum ähnlich wie in unsere Lebensraum Abstände und Winkelbeziehungen zwischen Klängen definiert werden können. Die obige Dimensionsabschätzung berücksichtigt als psychoakustische Randbedingung nur den Frequenzbereich für hörbaren Schall, das heisst sie behandelt das Gehör als idealen Frequenzanalysator. Diese Dimensionszahlen reflektieren die beliebig vielen Freiheitsgrade der idealen Saitenschwingung bei ihrer Einschränkung auf den endlichen Hörbereich.

Berücksichtigt man neben dem Hörbereich als weitere psychoakustische Randbedingung die beschränkte Frequenzauflösung der Basilmembran, so erhält man in nahe liegender Weise Raumstrukturen mit einer Dimensionszahl, die immer noch grösser als 20 ist: Überdeckt man nämlich den Hörbereich mit disjunkten kritischen Bändern und wählt in jedem je eine Sinustonzfrequenz f_i aus, so können die zugehörigen Amplituden a_i (innerhalb gewisser Grenzen) unabhängig von einander variiert werden und gemäss Definition der kritischen Bandbreite müsste für jede Amplitudenkonstellation ein stationärer, im Allgemeinen nicht-periodischer schwebungsfreier Zusammenklang $\sum_{i=1}^{24} a_i \cdot f_i$ entstehen. Ändert man die Amplituden

überwiegend bezogen auf die Einzeltöne, so ändert sich der Höreindruck – der „Anregungszustand“ der Basilmembran. Die Dimension zugehöriger Klangfarbenräume stationärer quasiperiodischer Schallsignale ist damit gleich der Maximalzahl disjunkter kritischer Bänder, also etwa 24 [vgl. Plomp 1976]. Diese Dimension kann alters- und berufsbedingt abnehmen. Derartige Klangraumstrukturen sind für alle periodischen und quasiperiodischen Klänge definierbar, wenn ihre Teiltonkomponenten genügend gut getrennt sind. [Benedini, 1978] Die von Helmholtz definierten *musikalisch brauchbaren Klänge* stellen ein Spezialfall solcher Klänge dar, und wenn Helmholtz von der Klangfarbe von Klängen mit inharmonischen Teiltönen spricht, sind derartige Strukturen – die kleinsten, die sowohl periodische als auch quasi-periodische Klänge umfassen –, gemeint [vgl. Kap. 8.2].

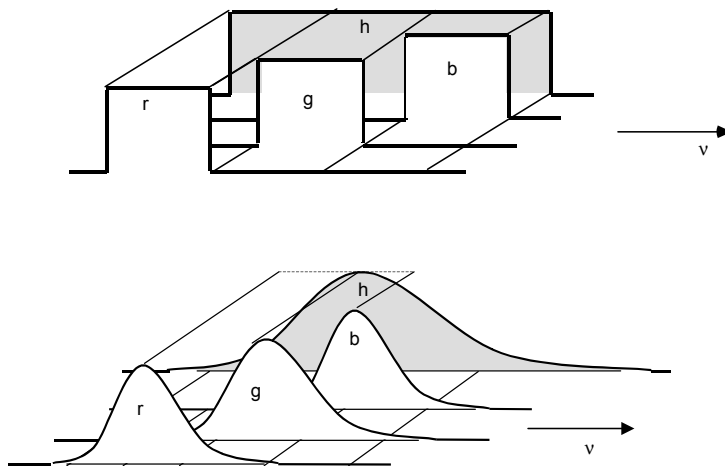
Bei den in seinem Stimmgabelsynthesizer getesteten periodischen Klängen aus acht Teiltönen findet nach Helmholtz' Versuchen keine Klangfarbenänderung statt, wenn die Teiltonphasen bei gleichen Amplituden variiert werden.

Bei Insensitivität für Phasenrelationen und für einem *festen* Frequenzvorrat reduziert sich die Zahl vollständig beschreibender Parameter um die Hälfte. Bei variablem Frequenzvorrat sind 24 Amplituden und 24 Frequenzen notwendig zur vollständigen Beschreibung schwebungsfreier, stationärer Klänge.

Sobald mechanische Phaseneffekte auf der Basilarmembran, die sich dem Gehör in Form von Schwebungen, Rauigkeit mitteilen, auftreten, sind die Töne als nicht unabhängig von einander anzusehen, sie liegen innerhalb eines kritischen Bandes.

Man ist versucht – wie Plomp [1976] – der Einteilung des Frequenzbereichs in kritische Bänder ein allgemeines Klassifikationsverfahren zur Seite zu stellen, bei dem die spektrale Energie pro kritischem Band via stückweiser Integration ermittelt wird. Es ergeben sich dann ebenfalls 24 Kennzahlen und die Berechnung ist für beliebigen Schall anwendbar. Die zeitlich kontinuierliche Veränderung der spektralen Zusammensetzung eines Klangs wäre dabei als Wanderung eines Punktes in einem 24-dimensionalen Vektorraum zu deuten.

Unschönerweise ergibt sich bei einer derartigen Modellierung der Klangfarbe eine sprunghafte Änderung der Koordinaten eines Sinustons, wenn seine Frequenz kontinuierlich erhöht oder erniedrigt wird [vgl. Muzzolini 2000, 266], das heisst der Sinuston müsste seine Klangqualität in diskontinuierlicher Weise ändern, was nicht mit der Wahrnehmung bei einem Sinustongerator übereinstimmt.



Oben: Farbresonanzkurven als ideale Bandpassfilter. Unten glockenförmige überlappende Resonanzkurven, die die Farbwahrnehmung erklären. Lässt man eine frequenzvariable Sinusschwingung durch ein solches Resonanzsystem resultiert im obigen Fall ein sprunghafter Koordinaten Wechsel an den Filtergrenzen von (0,0,0,0) zu (1,0,0,1) zu (0,1,0,1) zu (0,0,1,1) zu (0,0,0,0) in den Koordinaten (r,g,b,h). Im Unterschied dazu variieren die Koordinaten des vierdimensionalen Spektralvektors im unteren Fall kontinuierlich. Auf Töne übertragen ergibt sich in Formantperspektive ein kontinuierlicher Klangfarbenwechsel, wenn die Tonhöhe kontinuierlich verändert wird. [Vgl. Kap. [4.4.7](#)]

Wie bereits erwähnt haben die Klangfarbenräume von Grey und diejenigen am Ircam in der Regel aber maximal die Dimension drei und von diesen hat nur eine mit der spektralen Energieverteilung im Klangspektrum zu tun. Es ist zu fragen, wo denn die Information der übrigen 23 Kennzahlen geblieben ist?

Benedini untersucht in seiner Dissertation stationäre harmonische Klänge aus sechs Teiltönen gleicher Lautstärke, die keine Rauigkeit infolge überlappender Resonanzbereiche aufweisen. Seinen Testklangvorrat erhält er durch Teilmengenbildung aus diesen sechs Tönen. Da an den Lautstärken nichts verändert wird, unterscheiden sich die Klänge zum Teil geringfügig in der Gesamtlautstärke. Phaseneffekte und Nicht-Linearitäten sind ausgeschlossen. Im psychoakustischen Experiment weist Benedini nach, dass die spektrale Beurteilung der Testklänge nicht durch eine einzige Dimension, durch den spektralen Schwerpunkt des inneren Spektrums, allein beschrieben werden kann. Er schlägt ein Zweikomponenten-Modell vor, das, anschaulich gesprochen, den euklidischen Abstand der Spektralvektoren mit einbezieht (der Abstand ergibt sich aus der Fläche der quadrierten Differenzen der Spektralkurven) [Benedini 1978].

Zumindest im Falle stationärer Klänge, wo das Augenmerk nicht durch spektrale

Veränderungen oder Einschwingvorgänge abgelenkt ist, erweist sich die Dimensionszahl 1 zur Beurteilung der spektralen Energieverteilung offensichtlich als zu niedrig.

Ersetzt man im Ansatz der stückweisen Integration, der sich als System disjunkter idealer Bandpassfilter deuten lässt, die Stufencharakteristik der Filterfunktion durch sich überlappende glockenförmige Funktionen mit endlichem Träger, so führt eine stetige Änderung der Frequenz eines Testtons zu einer kontinuierlichen Änderung des Kennzahlenvektors. Darüberhinaus kann mit der Dimension gespielt werden.

Das Auge verwendet bei der Farberkennung drei Typen von Rezeptorzellen, deren Filtercharakteristik ebenfalls glockenförmige sich überlappende Kurven darstellen. Die Frequenzauflösung des Gehörs ist zwar viel feiner, und es gibt auf der Basilarmembran nur einen Typ von Rezeptorzellen, dennoch bietet sich hier eine Möglichkeit Klangfarbenräume zu definieren. Löst man sich etwas von der Idee der kritischen Bänder und lässt wie fürs Auge drei derartige überlappende Filterfunktionen zu, gelangt man zu einer dreidimensionalen Deutung beliebiger kontinuierlicher und diskreter Spektren. Stetige Veränderungen in den Amplituden und Frequenzen (als Funktion der Zeit) führen dabei immer zu stetiger Änderung des Kennzahlenvektors. Es kann vorkommen und ist bei dieser Modellierung erwünscht, dass verschiedene Spektren zum gleichen Kennzahlenvektor führen. Die drei Kennzahlen bedeuten eine differenziertere Beschreibung der spektralen Energieverteilung als die obige Helligkeit und sie enthalten die Information der Helligkeit. Während die Helligkeit nicht zwischen breitbandigen und schmalbandigen Klängen differenziert, geben drei Kennzahlen eine deutlichere Vorstellung von der spektralen Energieverteilung, insbesondere könnte in metaphorischer Weise der optische Farbbegriff auf die Klangfarbe übertragen werden, die in Übereinstimmung mit Wortkombinationen wie rosarotes und weisses Rauschen kompatibel ist. Ein purpurner Ton/Klang etwa zeichnet sich aus durch Frequenzanteile im hohen und im tiefen Bereich, ein grüner durch Frequenzanteile ausschliesslich im mittleren Bereich. Der grüne und der purpurne Ton können je nach Stelle des purpurnen Tons auf der Purpurlinie die gleiche Helligkeit im obigen Sinne haben. Der Terminus Helligkeit hingegen ist bei dieser Übertragung nicht verträglich mit der optischen Helligkeit im Sinne von Helmholtz. Denn diese ist mit der Gesamtintensität und nicht mit dem Schwerpunkt des Spektrums assoziiert. Manchmal wird in der psychoakustischen Literatur der Begriff Schärfe auf die gleiche Weise spektral charakterisiert wie die Helligkeit.

Ein solches Farbenmodell ist genügend allgemein, um die erwähnte Modellierung von Benedini [1978] einzufangen.

Gestaltet man die Position und Breite der Filterfunktion variabel, wird es möglich, dadurch formantbildende Instrumentalklangfarben oder Töne der Singstimme zu klassifizieren. (Ein Berechnungsverfahren, welches das innere Spektrum in dieser Weise analysiert, braucht nur ein lineares Gleichungssystem mit einer Bandmatrix (*B-Splineinterpolation*) auszuwerten). In vergleichender elektrotechnischer Terminologie spricht Reuters von der Einstellung der Filterbank auf den aktuellen Klang als Teilphase der Tonverarbeitung, die sich an die mehr zeitliche Interpretation des Einschwingvorganges als Ganzes anschliesse. [Reuter 1995, 15-17].

Legt man die Vorstellung solcher variabler Analysefilter zugrunde, so könnte sich die Erhöhung der Helligkeit eines gesungenen Vokals *a* bei gleicher Tonhöhe und gleicher Lautstärke, so auf die spektrale Zusammensetzung auswirken, dass mehr Energie in den höheren der beiden Filterbereiche, die sich je auf die Vokalformanten einstimmen, fällt. Für die Kennzahlen der auf die beiden Formantbereiche eingestellten Filterfunktionen bedeutet der Übergang eine Abnahme in der ersten und eine Zunahme in der zweiten Kennzahl.

Insgesamt wären also – wenn man von der allgemein akzeptierten Charakterisierung der

Vokalqualität durch zwei Formanten ausgeht – zur quantifizierenden Beschreibung einer Vokalise auf einem Ton konstanter Höhe und Lautstärke, welche eine Modulation der Helligkeit bei gleichem Vokal zulässt, vier Parameter erforderlich: die Stärke der Grundfrequenz, die beiden Formantfrequenzen, das Verhältnis der Kennzahlen zu den beiden Formanten.

Die Klangfarbencharakterisierung musikalischer Instrumente durch Carl E. Schumann [Schumann 1925] behauptet für viele Musikinstrumenten das akustische Vorhandensein von mindestens zwei, den Vokalformanten entsprechenden Zonen verstärkter spektraler Intensität. Nach dieser Theorie sind Intensitätsänderungen und Grundfrequenzänderungen über ihren Effekt auf die Energieverteilung auf die Formanten beschreibbar [für ein knappe Darstellung der Schumannschen Klangfarbengesetze vgl. Reinecke 1967]. Eine räumliche Verortung dieser Klänge, erforderte, wenn sie sich psychologisch konsistent nachweisen liesse, eine mindestens ebenso hohe Dimension wie diejenige der Vokale. Die Dimension ist nämlich mindestens ebenso gross wegen der Zahl der Formanten, und sie abstrahiert von der Bedeutung der Spektraldynamik des Einzeltons. Eine Kartographierung synthetischer Vokale gleicher Tonhöhe und Klangfarben wird in Leirdahl [1987] diskutiert [vgl. Kap. 7.6].

Diese Art mehrdimensionaler Klangcharakterisierung abstrahiert nicht nur von der zeitlichen Hüllkurvencharakteristik und Spektraldynamik, sie erlaubt nicht einmal, zwischen Klängen mit kontinuierlichen und diskreten Spektren zu differenzieren. Der Unterschied zwischen mehr geräuschhaften, kontinuierlichen und eher harmonischen und diskreten Spektren erforderte also weitere Kennzahlen und damit eine weitere Erhöhung der Dimension. Die Rauigkeit nach Helmholtz beispielsweise wird im Falle von Nadelspektren über die Frequenzdifferenzen und Amplitudenverhältnisse benachbarter Teiltöne ermittelt. Bei kontinuierlichen Spektren wäre für ihre Verallgemeinerung etwa der Abstand benachbarter Maxima im Spektrum sowie die Breite einzelner Buckel in Rechnung zu ziehen [vgl. Zwicker 1967].

Daran wird die limitierte Anwendbarkeit von statischen am kontextfreien Einzelton orientierten, räumlichen Interpretation der Klangfarbe ersichtlich, denn zweifellos können auch wenig geübte HörerInnen Unterschiede der Helligkeit zwischen Vokalen des gleichen Typs und ein allfälliges Vibrato erkennen. Es scheint aber durchaus nicht zwingend, dass diese gleichzeitig und unabhängig perzipierbaren Aspekte in ihrer Kombination drei- oder höherdimensionale konsistente Vorstellungen evozieren sollen.

7.5. Chowning (1973)

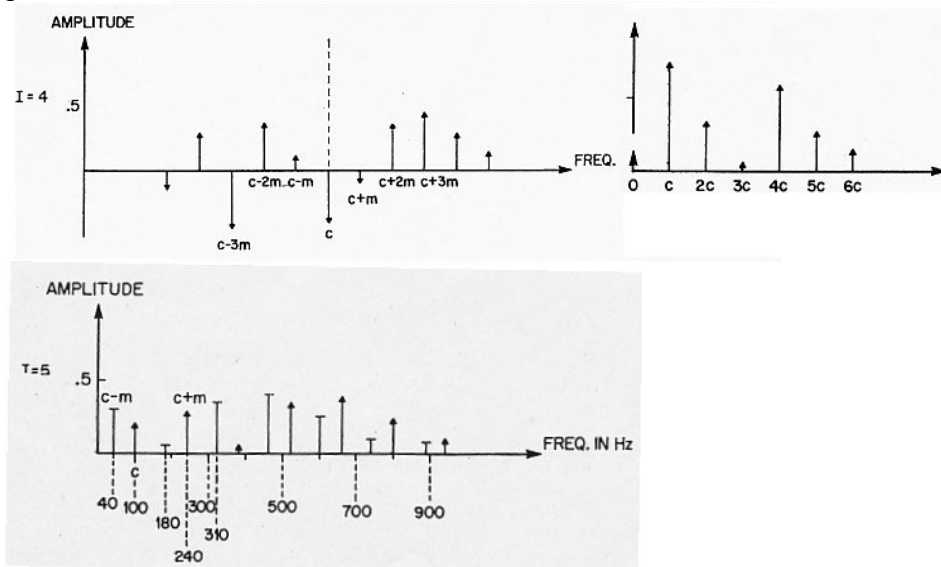
Chowning[1973] erhebt die Frequenzmodulation zum Prinzip der Schallsynthese. Es gelingt ihm dabei, eine grosse Zahl bekannter Instrumentalklänge mit wenigen Bausteinen zu approximieren. Das elektrotechnische Verfahren wurde in Jamaha-Synthesizern TX5 und TX7 zur Klangerzeugung eingesetzt.

AM-Modulation und FM-Modulation

Ein sinusförmig amplitudenmoduliertes Sinus-Signal (AM) kann mittels trigonometrischer Umformung als Superposition dreier Sinussignale mit äquidistanten Frequenzunterschieden gedeutet werden. Das Amplitudenspektrum ist dabei symmetrisch zur Mittelfrequenz.

Ein frequenzmoduliertes Sinussignal (sinusmodulierter Träger) hingegen benötigt unendlich viele solche ebenfalls gleichabständige zur Trägerfrequenz symmetrisch angeordnete additive Komponenten. (Die Amplituden dieser Komponenten können mit Hilfe von Besselfunktionen ermittelt werden). Ist der Frequenzabstand ein ganzzahliger Teiler der Trägerfrequenz, ergibt sich ein periodisches Signal, dessen Grundfrequenz, die Modulationsfrequenz, gleich dem

Frequenzabstand der Sinuskomponenten ist. Da negative Frequenzen im Fourierspektrum als Sinustöne mit umgekehrtem Vorzeichen gedeutet werden können (= „Phasenumkehr“ oder „Phasenverschiebung um eine halbe Periode“), erhält man, wenn genügend viele Sinuskomponenten zugelassen werden, auf diese Weise Nadel-spektrumspektren, die wegen der Interferenz der beiden Frequenzen mit gleichem Betrag nicht spiegelsymmetrisch zur Trägerspektrallinie sind.



Spektren Frequenzmodulierter Signale. Oben links: Falls die Modulationsfrequenz m klein gegenüber der Trägerfrequenz c ist, ergibt sich (bis auf das Vorzeichen) ein symmetrischer Amplitudenverlauf bezüglich c . Rechts: Berücksichtigt man bei kleiner Trägerfrequenz c und rationalem Verhältnis zwischen Träger und Modulationsfrequenz m den Effekt der „negativen Seitenfrequenzen“ im linken Seitenband, so entstehen harmonische Amplitudenspektren mit nicht symmetrischer Hüllkurve. Bei irrationalem Verhältnis zwischen c und m entstehen komplexe inharmonische Spektren, die als Überlagerung zweier Systeme äquidistanter Frequenzen gedeutet werden können. [Quelle: Chowning 1973, 528, 529]

Es entstehen auch dann harmonische Spektren, wenn die Modulationsfrequenz ein Vielfaches der Trägerfrequenz ist, oder wenn die beiden Frequenzen gleich oder in einem rationalem Verhältnis stehen. Im Falle *irrationaler* Frequenzverhältnisse hingegen erhält man diskrete Spektren, die sich im positiven Frequenzhalbraum als Überlagerung zweier Gruppen äquidistanter Spektren darstellen lassen. Durch Multiplikation solcher FM-Signale mit einer Trägerfunktion erhält man eine Vielfalt dynamischer Klangveränderungen. Der technische Vorteil dieser Art analoger Klangerzeugung liegt darin, dass nur wenige Oszillatoren gebraucht werden, allerdings ist der Effekt der Modifikation ihrer Parameter auf das Frequenzspektrum nicht leicht durchschaubar.

7.5.1. FM-Analyse?

Könnten die FM-Kennzahlen für eine geometrischen Klassifikation mit sinnesphysiologischer oder -psychologischer Relevanz herangezogen werden? Die Kennzahlenfolge kann als Punkt in einem Vektorraum angesehen werden (analog zum gewöhnlichen Fourierspektrum) und es wäre zu untersuchen, ob die Abstände solcher Punkte der psychologischen Unähnlichkeitsempfindung entsprechen könnte.

Es ist dabei zu beachten, dass die Darstellung eines Klanges als Summe von FM-Bausteinen ohne weitere Einschränkungen nicht eindeutig ist, das heißt es können verschiedene Darstellungen der gleichen Zeitfunktionen existieren. Der „Abstand zweier mehrdeutiger Zeitfunktionen“ ist demnach nicht unabhängig von der gewählten FM-Darstellung. Da nämlich die gewöhnliche additive Darstellung eines periodischen Klanges mit Hilfe von

Sinustönen als Spezialfall einer FM-Synthese mit gleich vielen Bausteinen wie Teiltönen angesehen werden kann, ist dies eine alternative Beschreibung der sinusmodulierten FM-Signale, bei denen Träger- und Modulationsfrequenz in ganzzahligem Verhältnis stehen. Die Forderung nach einer Minimalität der Darstellung dürfte die Mehrdeutigkeit reduzieren. Da bei der FM-Synthese schon wenige Bausteine zu befriedigenden Klangsynthesen führen, ist jedenfalls zu erwarten, dass ein geometrischer FM-Klangraum keine besonders hohe Dimension hätte. Zur Darstellung der FM-Synthese als Mittel zur einer instrumentenfamilienähnlichen hierarchischen Kartographierung der Klangfarben, vgl. Mazzola [1990, 288-290]. Die Familienbildung geschieht dort über Isomorphie und elementare Umwandlungen der Verknüpfungsgraphen der Klänge. Eine Verbindung zweier Sinusbauausteine in einem solchen Graphen besteht dann, wenn der eine durch den andern frequenzmoduliert wird. Die erwähnte Uneindeutigkeit der Darstellung bedeutet in der Sprache der Graphen, dass nicht isomorphe Graphen, die gleiche Klangfarbe repräsentieren können.

7.6. Lehrdahl: *Timbral hierarchies* (1987)

Bekannt geworden sind Leirdahl, Jackendorff mit ihrem Ansatz einer generativen Theorie der tonalen Musik [Leirdahl, Jackendorff 1983] in Anlehnung an Chomsky (generative Grammatik) und in Verallgemeinerung von Schenkers Urlinienkonzept. Mit gleicher Darstellungssymbolik wie in jenem Aufsatz schlägt Leirdahl in *Timbral hierarchies* die Anwendung gewichteter Baumstrukturen zur ordnenden, hierarchischen Strukturierung der als multidimensionales Attribut verstandenen Klangfarbe vor. Experimentiert wird dabei mit synthetische Klänge gleicher Tonhöhe und gleicher Lautstärke.

An Aspekten dimensionsbildender Natur werden [Leirdahl 1987, 141-142]

- Helligkeit
- Vibrato (Frequenzmodulation) / Tremolo (Amplitudenmodulation)
- Anschlagsdynamik / Hüllkurvenverlauf
- Rauigkeit
- Inharmonizität

genannt.

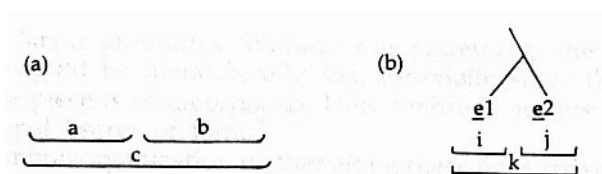
Bezüglich der Ordnungsstrukturen im Bereich der Tonhöhe gelangt Leirdahl zur Feststellung, dass in den meisten musikalischen Kulturen eine auswählende Diskretisierung des Kontinuums der Tonhöhen vorgenommen wurde, ohne welche die Ausbildung eines musikalischen Idioms einer gewissen kognitiven Komplexität unvorstellbar sei [Leirdahl 1987, 143]. Eine solche Auswahl ist als Raster von Bezugspunkten zu verstehen. Wirkliche Töne dürfen, wie auf einem verstimmten Klavier durchaus neben den Referenztonhöhen liegen, ohne dass dadurch die musikalischen Intervallbeziehungen gefährdet sind. Ein solche Zurechthörbarkeit ist nur dann möglich, wenn die Tonhöhen sich genügend stark unterscheiden, um mehr also als nur gerade um die gerade merklichen Unterschiede. Leirdahl verwendet dafür den Begriff des *Prototypen*, der einen auserwählten Vertreter unter einem Merkmal oder einer Merkmalskombination darstellt, auf den andere Klänge hierarchisch (direkt oder indirekt) bezogen werden. Die Prototypen gleichen den Default-Werten bei der Vorbelegung von Variablen in der Computerterminologie [Leirdahl 1987, 144-145] und sie sind als Gesamtheit vergleichbar mit einer endlichen Farbkarte (zum Beispiel 16 oder 256 in gewissen älteren grafischen Datenformaten). Es geht Leirdahl bei der Auswahl der Prototypen nicht um eine vollständige Überdeckung des Klangfarbenraums durch ihre Valenzen, wie sie in Analogie für ein physiologisch adäquates bildgebendes

System zu fordern ist, sondern um eine willkürliche Festsetzung gut verteilter fixierter Punkte. Innerhalb eines solchen Systems soll die Möglichkeiten des Komponierens im Sinne Schönbergs Klangfarbenmelodien erforscht werden.

Geleitet wird die hierarchische Kartographierung des Klangfarbenraums durch Übertragung der klassischen musikalischen Ordnungskonzepte Intervall, Skala, Konsonanz/Dissonanz. Metaphorisch spricht Lehrdahl von *timbral consonance and dissonance* [Lehrdahl 1987, 141-142] unter dem Gesichtspunkt von Stabilitätsbedingungen, die je nach Idiom variieren können. Dabei wird grössere Stabilität und Entspannung mit Konsonanz, Instabilität und Spannung mit Dissonanz assoziiert.

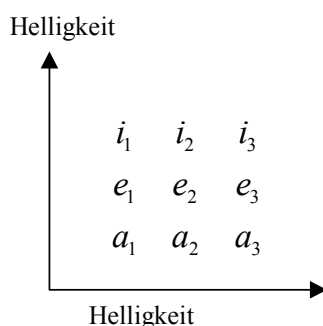
Die oben genannten Parameter des Klangfarbenraums können alle hinsichtlich der Konsonanz/Dissonanz-Polarität gedeutet werden, das heisst die mehrdimensionale Struktur wird auf die eindimensionale Stabilitätsdimension projiziert. Dabei wirkt gemäss Lehrdahl ein mittlerer Grad an Vibrato, Inharmonizität und eine geringe Helligkeit im Idiom der klassischen Musik stabilisierend, grosse Helligkeit, fehlende oder übermässige Inharmonizität dagegen destabilisierend.

In der musikalischen Interpretation werden die zeitlich aufeinander folgenden Klänge einer „Klangfarbenmelodie“ nach einem relativen, graduellen Konsonanzkonzept zu komplexen Baumstrukturen zusammengefasst (*grouping structures* und *prolongation trees*)



(a) Klammerbögen für gewöhnliche hierarchische Gliederung. (b) prolongation tree. Die asymmetrische Baumstruktur bringt zum Ausdruck, dass das Ereignis e_1 seinem Nachfolger e_2 untergeordnet ist, dass sich die „Dissonanz“ e_1 in e_2 auflöst. [Quelle: Lehrdahl 1987, 139]

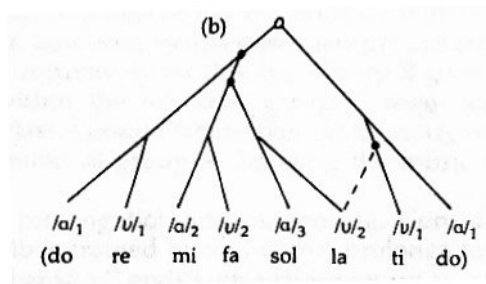
Die beiden Aspekte Vibrato und Vokaltyp (a-e-i) werden beide als Helligkeitsdimensionen angesehen, in dem Sinn dass ein frequenzmodulierender Vokal mit zunehmender Modulationsstärke heller wird. Dabei ergibt sich mit 9 Prototypen folgende Struktur:



Zwei Helligkeitsdimensionen nach Lehrdahl 1987

Lehrdahl versucht durch geschickte Wahl der Prototypen diese neun Punkte für die Wahrnehmung so anzuordnen wie in der obigen Figur, er setzt also einen zugehörigen stabilen Abstands begriff im Klangfarbenraum voraus.

Vergleichend mit der Skala diatonischen Skala gibt er eine Interpretation in den Vokalprototypen, die die gleiche hierarchische Struktur aufweist; die Deutung der diatonischen Skala ergibt sich aus einer unterlegten harmonischen Interpretation:



[Quelle: Lehrdahl 1987, 153]

7.7. Oktavidentität im Klangfarbenraum?

Lehrdahl weist mehrfach darauf hin, dass die Klangfarbenräume keine Möglichkeit böten, die Oktavidentität nachzubilden. Dem ist entgegenzuhalten, dass bei den üblichen durch MDS gewonnenen *timbre spaces* immer schon die Vorstellung des euklidischen Vektorraums über den reellen Zahlen zu Grunde liegt. Die Möglichkeit zyklischer Grundstrukturen wird dabei durch das Verfahren der topologischen Verortung der Testklänge a priori ausgeschlossen. Wenn unser Weltall aber gekrümmt wäre, könnte es vorkommen, dass wir immer geradeaus gehen und dennoch von Zeit zu Zeit wieder am Ausgangspunkt unserer Wanderung ankommen.

Ein zyklische Deutung der Klangfarbe stellt die (in Kap. 7.2 vorgestellte) Auffassung von Hauer dar. In naheliegender Weise zu zyklischen Strukturen führt auch die Berücksichtigung von Phaseneffekten auf die Klangempfindung, denn eine kontinuierliche Erhöhung des Phasenwinkels führt spätestens nach einer vollen Periode zu identischen Signalen. Die Oktave wäre also eine volle Umdrehung des Phasenwinkels, der Tritonus eine halbe. Bemerkenswerterweise sind MDS-Verfahren in zyklische und gemischt zyklisch/lineare Strukturen meines Wissens noch nie diskutiert oder getestet worden. Mazzola macht eine Andeutung in diese Richtung, wenn er schreibt:

Wahrscheinlich definieren die Klangfarbenvalenzen in einem Summenraum von physikalischen Parametern topologisch mehrfach zusammenhängende verschlungene Bereiche. [Mazzola 1990, 50]

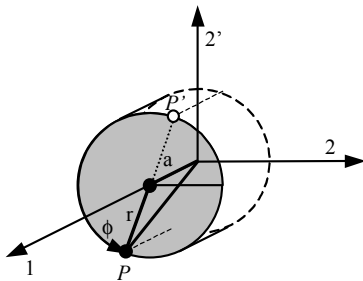
Unter dem in der Informationstheorie gebräuchlichen Begriff der *Valenz* [Meyer-Eppler 1969] werden Mengen von bezüglich einem Merkmal oder bezüglich einer Merkmalskombination ununterscheidbarer Objekte der Wahrnehmung verstanden. Bei der geometrischen Vermessung der Farben gleicher Helligkeit bilden die Valenzen zu einem vorgegebenen *Prototypen* im Sinne von Lehrdahl elliptische Bereiche verschiedener Größe und Ausrichtung innerhalb der Schuhsohlendarstellung, falls für die Darstellung die lineare Farbmischungseigenschaft vorausgesetzt wird [vgl. Schläpfer 1993, 66 und Muzzolini 2000, 263].

Die „Urbilder“ auditorisch ununterscheidbarer Klänge bilden, wenn man sie in physikalischen Merkmalskoordinaten ihres Schallsignals (zum Beispiel als zeitvariantes Fourierspektrums) ausdrückt, komplizierte verschlungene Bereiche. Umgekehrt können topologisch einfache Nachbarschaftsverhältnisse in den physikalischen Klangparametern unerwünschterweise zu verschlungenen Strukturen in den Klangfarbenräumen führen, wenn eine kontinuierliche Änderung der physikalischen Parameter zu einer diskontinuierlichen Änderung im Empfindungsraum führt. Zu denken wäre etwa an einen qualitativen Umschlag (lebos – belebt) beim Übergang zwischen periodischen und quasi-periodischen Klängen, hervorgerufen durch eine minime Frequenzveränderung.

Die folgenden Gedanken entstammen einem unveröffentlichten Manuskript des Autors [1985] und versuchen auf spekulativem Weg eine elementargeometrische Deutung des

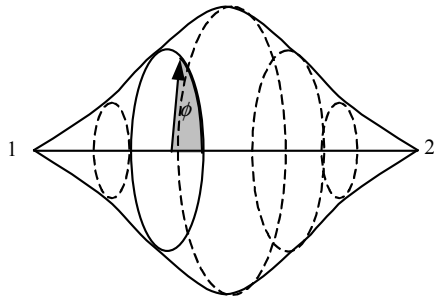
Phaseneinflusses auf die Klangfarbe im einfachsten Spezialfall der Überlagerung zweier Sinustöne. Eine psychoakustische Verifikation steht aus.

Die Darstellung der Amplitude und Phase eines Teiltöns bedient sich in einer physikalisch motivierten Sicht mit Vorteil der Polarkoordinaten in der reellen Zahlenebene oder in den komplexen Zahlen. Veränderung des Phasenwinkels bei gleicher Amplitude bedeutet dabei Herumwandern auf einem Kreis. Nach einem vollen Umlauf wird aus einem Sinuston ein identischer Sinuston. Beim „Geradeausgehen“ bezüglich Phasenwinkel, das heisst bei einer kontinuierlichen Phasenmodulation, bewegt man sich also in „Wirklichkeit“ im Kreis herum. Die elementare Darstellung eines Klangs aus zwei Teiltönen lässt sich in drei Dimensionen veranschaulichen, wenn man von der Startzeit (und der Hüllkurve) des Klangs abstrahiert. Dabei wird der Teilton dessen Phase variiert wird, in einer komplexen Ebene dargestellt, der andere der Referenzton in dazu orthogonaler Richtung. Variation des Phasenwinkels bei gleichen Amplituden ergibt auch in dieser dreidimensionalen Situation eine Bewegung auf einem Kreis.



Naive räumliche Darstellung eines Klangs P aus zwei Teiltönen im Oktavabstand in Zylinderkoordinaten. Die Koordinatenachse 1 misst die Amplitude a des Referenztons (Grundtons) mit fixierter Nullphase, die Ebene mit dem Achsenpaar $(2, 2')$ misst die Amplitude r und die Phase ϕ des zweiten Teiltöns.

Gemäss den Angaben von Plomp, Steneken [1969] ist der Einfluss einer Phasenänderung auf die Klangfarbenempfindung im Vergleich zu einer Amplitudenänderung gering. Der maximale euklidische Abstand $2r$ zweier Klänge P und P' mit denselben Amplituden a und r wie in obiger Darstellung kann die psychologische Entfernung nicht korrekt wiedergeben, denn vermindert man die Amplitude a der Referenztöne gegen 0 und lässt dabei die Oktavtöne invariant (man bewegt sich dabei auf den gestrichelt eingezeichneten Geraden des angedeuteten Zylinders), so bleibt der Abstand konstant, obschon der Unterschied der beiden Klänge zu Sinustönen der Oktave ohne Grundton beliebig klein und der Phasenwinkel (bei sukzessiver Darbietung) also irrelevant wird. Eine wahrnehmungsrelevantere dreidimensionale Topologie, die den Phaseneinfluss vom Amplitudenverhältnis ($r : a$) abhängig macht, stellt möglicherweise eine spindelförmige Anordnung der Klangfarben wie folgt dar:



Darstellung der Klänge gleicher Lautstärke aus zwei Teiltönen auf einer Spindelfläche. Die horizontale Achse stellt das Intensitätsverhältnis der beiden Teiltöne auf einer Strecke dar. Zu erwarten ist ein maximaler Einfluss des Phasenwinkels ϕ auf die Klangfarbe, wenn die Amplituden (bzw. Intensitäten) vergleichbare Grösse haben. Dominiert der Grundton (1) oder der Oberton (2) sehr deutlich, nimmt dieser Einfluss ab. Die Punkte mit gleichen Amplituden aber verschiedener Phase rücken dabei näher zusammen. Die Spindelfläche ist zusammenhängend, da bei kleinen Änderungen der Phasen und des Amplitudenverhältnis kleine Änderungen in der Klangfarbe zu erwarten sind. Die Rotationssymmetrie zur Achse 1-2 ergibt sich, wenn gleiche Änderung des Phasenwinkels gleiche Änderung der Klangwirkung verursacht, andernfalls deformieren sich die Kreislinien zu anderen geschlossenen Kurven im einfachsten Fall zu Ellipsen. Besteht überhaupt kein Phaseneinfluss, dann degeneriert die Spindelfläche zur Verbindungsachse 1-2, denn dann ist bei gegebenen Frequenzen und Lautstärke, der Klangeindruck nur vom Intensitätsverhältnisses der beiden Töne abhängig.

Falls die Klangempfindung unter den elementargeometrischen Transformation des Zeitsignals „Krebs“ und „Umkehr“ an der Zeitachse, wie Hermann [1896] gegen Koenig behauptet, invariant wäre, bedeutete dies, dass Punkte an verschiedenen Orten der Spindel zur gleichen Klangfarbenvalenz gehören. Eine solche Klangfarbenvalenz entspricht also einem nicht zusammenhängenden Bereich, sowohl in der Spindel- als auch in der „naiven“ Darstellung. Eine Transformation, welche die Spindel in eine geometrische Darstellung überführt, die diesem hypothetischen Sachverhalt der Symmetrieminvarianz Rechnung trüge, müsste die an verschiedenen Stellen befindlichen ununterscheidbaren Klangfarbenpunkte mit einander verkleben.

Im Gegensatz zu Hermanns Behauptung gegen Koenig [Hermann 1896] können umkehrsymmetrische Klänge (Vertauschung von *push* und *pull*) gemäss Craig, Jeffress [1962] schon im einfachen Fall von zwei Teiltönen im Oktavabstand mit $a = 2r$ unterschieden werden [vgl. Kap. 6.13]. Bezüglich Symmetrien im Zeitsignal ist zu beachten, dass je nach Parität der Grundfrequenzverhältnisse bei ausgezeichneten Phasenbeziehungen eine andere Anzahl von „Kreissymmetrien“ und „Umkehrkreissymmetrien“ auftreten kann. Die Verwandlung der Spindelfläche gehorcht also beim Grundfrequenzverhältnis 1 : 2 anderen Verklebungsgesetzen als beim Verhältnis 1 : 3, falls Zeitumkehr eines Klangs keinen Einfluss auf die Klangempfindung hat.

Es ist offensichtlich, dass eine geometrische Deutung der beschriebenen Art bei Berücksichtigung weiterer Teiltöne bald die Grenzen des Vorstellbaren überschreitet, denn die Dimensionszahl der naiven Ausgangslage beträgt $2n - 1$ bei n Partialtönen. Plomp, Steneken [1969] behaupten für symmetrische (nur Cosinuskomponenten) und antisymmetrische Zeitfunktionen (nur Sinuskomponenten) – die zu maximaler Umkehrasymmetrie (bezüglich *push* und *pull*) beziehungsweise maximal steilen Flanken gehören – in dem von ihm betrachteten Spezialfall mit $(a_n = 1/n)$ maximale Entfernung unter allen Phasenkonstellationen mit demselben Amplitudenspektrum. Gemäss ihrer topologischen Vorstellung bilden die symmetrischen und die antisymmetrischen Klänge mit gleichgerichteten Amplituden die Pole im Raum der Phasenbeziehungen, für die der Phaseneinfluss am deutlichsten merkbar ist und alle anderen Konstellationen liegen dazwischen. Plomp

verwendete digital erzeugte Signale aus einer einzigen Schallquelle (Kopfhörer beidohrig). Der Phasengang des Wiedergabesystems war flach bis zu 2000 Hz [vgl. auch Kap. [6.14](#)]. Wie bereits erwähnt wäre meines Erachtens ein MDS-Verfahren, das der zyklischen Natur der Phasenrelationen Rechnung trägt über zyklischen Grundstrukturen (z.B. Z_n -Module in diskreter Modellierung) zu entwerfen, falls geometrisch verbindliche Ergebnisse erwartet werden wollen.

8. Spektralanalyse im 19. und 20. Jahrhundert

Dieses Kapitel schliesst an Kapitel [1](#) an. Die involvierte Mathematik ist aber schwieriger. Die dort getroffene Unterscheidung in kontinuierliche und diskrete Betrachtungsweisen wird in der modernen Analysis und ihren numerischen Verfahren wieder zunehmend bedeutsam. Computergestützte Verfahren zur Analyse und Verarbeitung analoger Daten (aufgezeichnete Schallsignale) basieren auf Diskretisierungen. Bereits die Aufzeichnung macht von einer zeitlichen (sampling-Rate) und einer amplitudenmässigen (Auflösung des a/d-Wandlers, z. B. 8 bit oder 32 bit) Diskretisierung Gebrauch. Für die Analyse solcher Daten sind von der modernen Mathematik auf die Natur solcher Daten abgestimmte Transformationen entwickelt worden, die daraus in vernünftiger Zeit die interessierenden Informationen ermitteln. Für die kontinuierliche analytische Betrachtungsweise ist der Satz von Fourier für periodische Funktion nicht genügend allgemein, da er weder den inharmonischen Frequenzverhältnissen noch der endlichen Dauer realer Klänge und Töne gerecht wird. In beiden Richtungen sind Verallgemeinerungen möglich. Die Berücksichtigung inharmonischer Frequenzverhältnisse bei stationären Klängen unendlicher Dauer, führt auf den Begriff der quasi-periodischen Funktionen. Die Analysen von Smith [1749] und Thomson [1877] der Schwebungsphänomene bei verstimmten Konsonanzen, können als diskrete Vorläufer der Theorie von H. Bohr angesehen werden, da sie Schwingungen mit *quasiperiodischen Impulsmustern* modellieren [vgl. Kap. [3.2.5](#) und Kap. [6.3](#)].

Der Spezialfall *periodischer Impulsmuster* diente Euler [1739] im *Tentamen musicae* zur Berechnung der Konsonanzgrade [vgl. Muzzolini, 1994]. Töne endlicher Dauer, werden stillschweigend als Ausschnitte von Tönen mit unendlicher Dauer behandelt.

Die mathematisch konsistente Berücksichtigung der endlichen Dauer von Tönen und Klängen bedeutet in der Fourierdarstellung den Übergang von der Summendarstellung zu einer Integraldarstellung. Dabei werden aus diskreten Nadelspektren kontinuierliche Spektralfunktionen. Das zugehörige Verfahren heisst Fouriertransformation und darf nicht mit dem Satz von Fourier verwechselt werden.

Während der mathematische Dimensions-, Abstands- und Winkelbegriff in Räumen von periodischen Klängen in naheliegender Weise unseren Lebensraum verallgemeinern, ist die Übertragung dieser Konzepte auf den Fall kontinuierlicher Spektren zwar möglich, aber der zu Grunde liegende Abstands-begriff, der zu seiner Berechnung selbst wiederum Integrale an Stelle des Satzes von Pythagoras benötigt, ist einer direkten Anschauung weniger zugänglich.

Der Fall zeitlich *diskretisierter periodischer Signale* führt zu den Verfahren der *diskreten Fouriertransformation* (DFT). Sie basieren auf dem Abtasttheorem, das gemäss Beth [1984, 27] auf C.-J. de la Vallée-Poussin [1908] zurückgeht. Letzteres besagt, das diskrete periodische Signale durch endlich viele Spektralkomponenten exakt beschrieben werden können. Bereits Carl Friedrich Gauss (1777-1855) hat allerdings die Verfahren der trigonometrischen Interpolation periodischer Funktionen studiert, was das äquivalente mathematische Problem darstellt. Der Text befindet sich im Nachlass unter dem Titel *Theoria interpolationis methodo nova tractata* [Vol. III, 265 ff] und ist ausführlich besprochen in Goldstine [1977, 233-258].

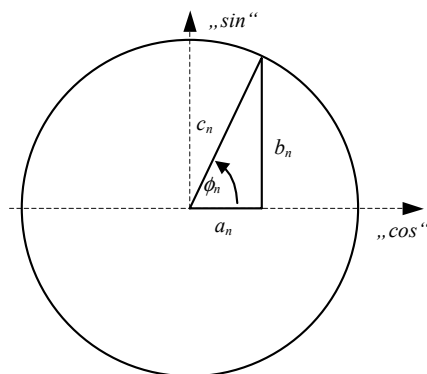
8.1. Der Satz von Fourier für periodische Funktionen

In Zusammenhang mit Untersuchungen zur Wärmeleitung stösst Fourier 1814 auf sein Berechnungsverfahren für die bernoullischen Partialamplituden und -phasen. Es müssen hierzu für jeden Teilton zwei Integrale berechnet werden:

$$a_n = \frac{1}{\pi} \cdot \int_{-\pi}^{\pi} f(t) \cdot \cos(nt) dt, \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \cdot \int_{-\pi}^{\pi} f(t) \cdot \sin(nt) dt, \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

Dabei ist $f(t)$ ein beliebiges periodisches Zeitsignal der Periodizität 2π , und a_n und b_n sind die Koeffizienten, das heisst die Koordinatenwerte der Teilschwingungen. Zu einem festem $n > 0$, definieren die beiden Zahlen a_n und b_n zusammen die Amplitude c_n und die Nullphase ϕ_n des n -ten Teiltönen über den Satz von Pythagoras:



Geometrischer Zusammenhang zwischen Cosinuskomponente a_n , Sinuskomponente b_n und Partialamplituden c_n , Phasen ϕ_n zur Partialtonordnung n .

Fasst man die Cosinusterme a_n für sich zu einem Summensignal zusammen, so erhält man den eindeutig bestimmten symmetrischen Anteil von $f(t)$, $a_0/2$ bestimmt den Referenzpunkt der Schwingung (Luftdruck) und ist in der Regel für akustische Berechnungen irrelevant. Dementsprechend bilden die Sinusterme b_n den antisymmetrischen Anteil von $f(t)$. Bei der additiven Überlagerung erhält man wiederum $f(t)$. In Formeln (ohne a_0) lautet die *Fourierdarstellung* von $f(t)$ wie folgt:

$$f(t) = \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cdot \cos(nt) + b_n \cdot \sin(nt)] = \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cdot \cos(nt) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \cdot \sin(nt)$$

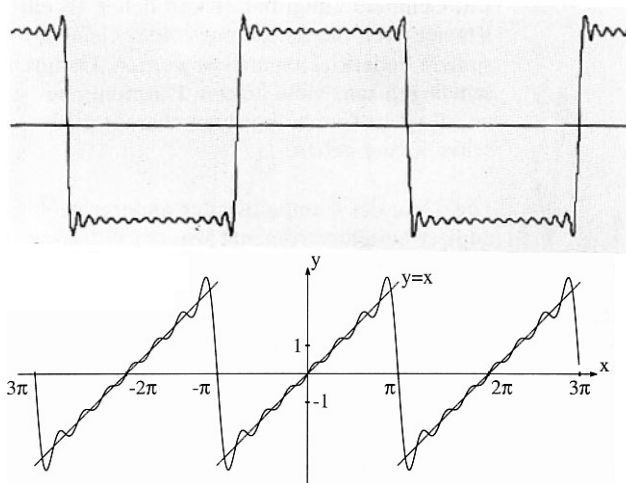
Bei einem zum Nullpunkt *krebssymmetrischen* Klang sind alle $b_n = 0$, und bei einem zum Nullpunkt *krebsumkehrsymmetrischen* Klang verschwinden alle a_n . Das heisst, es bleiben in der Summendarstellung nur der symmetrische bzw. nur der antisymmetrische Anteil.

In dieser Form wurde der Satz von Ohm, Seebeck und Helmholtz verwendet.

Dirichlet präzisiert 1826 das Resultat von Fourier [1822], indem er den Gültigkeitsbereich und das Konvergenzverhalten an Unstetigkeitsstellen der zu beschreibenden Schwingung einbezieht. Dirichlets Präzisierung heisst heute das *Theorem von Fourier*. In gewissen Fällen wie Sägezahnsschwingungen und Rechtecksschwingungen können die erwähnten Integrale formelmässig exakt für eine allgemeine Partialtonordnung n berechnet werden.

Die Präzisierung von Dirichlet besagt, dass die Fourierdarstellung an Unstetigkeitsstellen gegen das arithmetische Mittel der links- und rechtsseitigen Grenzwerte konvergiert.

Bei der Fouriersynthese von Signalen mit Unstetigkeiten oder Knicken (Unstetigkeiten in den Ableitungen) zeigt sich ein merkwürdiges Phänomen, dass nämlich in der unmittelbaren Nachbarschaft dieser Stellen ein Überspringen (Gibbs-Effekt) unabhängig von der Zahl der berücksichtigten Teiltöne auftritt. Er wurde von A. Michelson Ende des 19. Jahrhunderts entdeckt [Pinkus et al. 1997, 68-72]. Dies steht nicht im Widerspruch zur Konvergenz der Fourierdarstellung, die Breite der Spitzen im Rechteckimpuls konvergiert mit zunehmender Zahl von Teiltönen gegen 0, sodass die punktweise Konvergenz gewährleistet ist. Je nach Stetigkeitsbegriff und Modellierung der Wirklichkeit behält also Leonhard Eulers Gegenbeispiel gegen Daniel Bernoulli seine Richtigkeit, die trigonometrische Reihe stellt den Rechtecksimpuls nicht in jeder Hinsicht vollkommen dar [vgl. Kap. 3.1.5 und 3.1.6]. Das gleiche Argument betrifft die Steigung bei Dreiecksschwingungen, die sich in der Nähe der Knickstelle anomal verhält (Begründung: Integration der Rechtecksschwingung!).



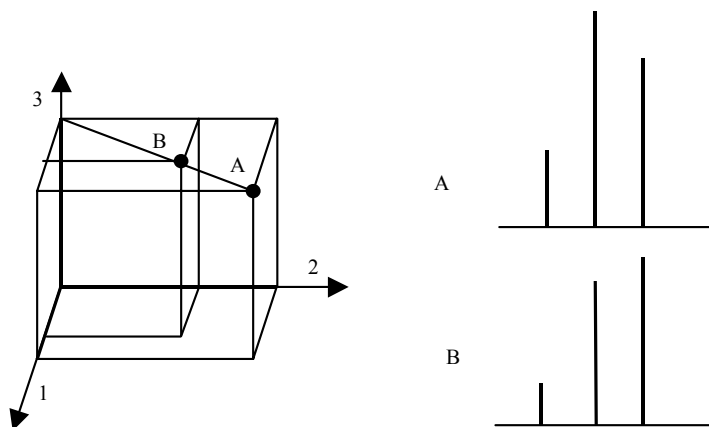
Gibbs-Effekt: Anomalie bei der Fouriersynthese von periodischen Signalen mit Unstetigkeiten, Knickstellen. [Quelle: Pinkus et al. 1997, 70]

Damit ist die mathematische Theorie der *periodischen* und kontinuierlichen Schwingungen vorläufig abgeschlossen. Es ist nun also möglich, Töne mit beliebiger periodischer Schalldruckfunktion als eindeutig bestimmte Überlagerung von Sinustönen zu deuten. Aus der Schalldruckfunktion können sogar die einzelnen Klangbestandteile – mit „Fourieranalyse“ – in ihrer individuellen Stärke und gegenseitigen Phasenlage berechnet werden. Die Bewegung der frei schwingenden idealen Saite bei vorgegebener Anfangsauslenkung kann nun vollständig mit Hilfe ihrer sinusförmigen Partialschwingungen charakterisiert werden, und nicht nur – wie bei Euler – als Superposition einer rechts- und einer linkslaufenden Welle entlang der Saite.

Dadurch erlangt die Sinusschwingung die von Bernoulli behauptete zentrale Bedeutung als Baustein periodischer Prozesse und wird zum Kandidaten für den Ton schlechthin, denn Orts- und Zeitfunktionen der idealen Saite können mit trigonometrischen Reihen vollständig beschrieben werden, und es scheint nahe liegend, die seit Mersenne immer wieder beobachteten Obertöne mit den nun „objektiven“ Sinusbestandteilen periodischer Schallsignale zu identifizieren.

Die moderne Mathematik erlaubt die Interpretation der Menge der periodischen Funktionen als Vektorraum, in denen die Sinus- und Cosinusschwingungen der Grundfrequenzvielfachen (mit Amplitude 1) ein vollständiges rechtwinkliges Koordinatensystem bilden. Das heisst

beliebige (quadratisch integrierbare) Klänge können in diesem Raum mit Hilfe von Koordinaten auf ähnliche Weise verortet werden, wie Punkte auf einem Blatt oder wie dreidimensionale Ortsangaben in unserem Lebensraum. Die Klangfarbe wird dadurch zum Punkt oder zur Leibniz'schen *Monade*, die in den Koordinaten der Sinustonbasis beschrieben werden kann. Die verbreitete Darstellung periodischer Funktionen als Nadelspektrum gibt diese Abstandsverhältnisse der *Spektralvektoren* nur ungenügend wieder.



Spektralvektor (Vektordarstellung) und Amplitudenspektrum zweier Klänge aus je drei Teiltönen. Die spektrale Darstellung lässt die räumliche Entfernung zwischen A und B nicht direkt erkennen, dafür können damit Klänge mit beliebig vielen Teiltönen in zwei Dimensionen veranschaulicht werden. In der Vektordarstellung kann die Entfernung eines Spektralpunkt A vom Koordinatenursprung als Mass für die Stärke angesehen werden. In der Spektraldarstellung wird diese zur Formel (Quadratwurzel aus der Summe der Amplitudenquadrate). Die Darstellung abstrahiert von den Nullphasen.

Merkwürdigerweise konnte in keiner der untersuchten Quellen des 19. Jahrhunderts eine solche räumliche Deutung des Fourierspektrums als Vektor gefunden werden.

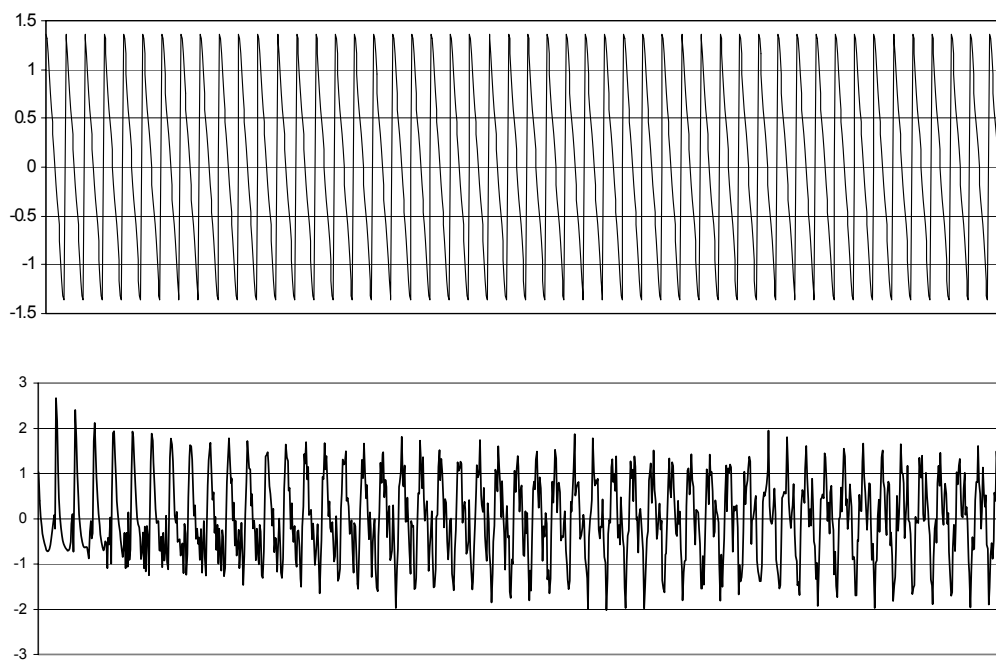
8.2. Inharmonische Teiltöne und quasiperiodische Funktionen

Was der Satz von Fourier in der ursprünglichen Form nicht leistet, ist die Analyse von nicht periodischen Signalen. So kann die additive Mischung zweier Sinustöne mit irrationalem Frequenzverhältnis mit Hilfe des Satzes von Fourier nicht in seine zwei eindeutig bestimmten Bestandteile zerlegt werden, da die zugehörige Zeitfunktion nicht periodisch ist. Dennoch braucht eine geringfügig (irrational) verstimmte Oktave nicht zwingend als Zweiheit erfahren werden. Und gerade diese geringfügig verstimmten Intervalle werden seit Einführung der temperierten Stimmungen und in unserem Zusammenhang seit Sauveur [1700], Smith [1749] immer wieder thematisiert. Zumeist wird dabei vom Schwingungsverlauf eines Tons soweit abstrahiert, dass er als Folge gleichgerichteter Impulse – wie bei Beekman und Smith – oder als Folge alternierend gegengerichteter Impulse wie bei Thomson angesehen wird. Die Superposition von Tönen wird bei dieser Abstraktion zu überlagerten Impulsmustern. Die Ansätze von Beekman und Smith zu Konsonanz (Koinzidenztheorie) und Schwebungen (längere Koinzidenzzyklen) können in moderner Terminologie auch als Diskretisierungen mit nur einem einzigen oder mit zwei Abtastwerten pro Periode und pro Ton gedeutet werden. Die Theorie der quasiperiodischen Funktionen (auch fast-periodische Funktionen) als verallgemeinerter Anwendungskontext der Fourieranalyse wird erst im 20. Jahrhundert durch

H. Bohr 1923 begründet [Myschkis 1981, 519-520]. Die quasiperiodischen Funktionen verallgemeinern die periodischen Funktionen in dem Sinn, dass eine periodische Funktion immer auch als quasiperiodische Funktion angesehen werden kann. Wenn von einem quasiperiodischen Klang der Signalverlauf und die vorkommenden Teiltonfrequenzen bekannt sind, können die Amplituden ähnlich wie bei der Fourieranalyse durch zugehörige Integrationen berechnet werden. Die vorkommenden Teiltonfrequenzen und ihre Amplituden sind immer eindeutig bestimmt. Sind die Frequenzen der Sinuskomponenten aber nicht vorgegeben, muss die Integration für alle möglichen Frequenzen, das heisst für alle reellen Zahlen durchgeführt werden, um herauszufinden ob eine betreffende Teiltonkomponente im quasiperiodischen Klang enthalten ist oder nicht, was eine Berechnung in vielen Fällen verunmöglicht.

Jeder quasiperiodische Klang – ein unendlich lange angehaltener „Klavierton“ konstanter Teiltonstärken oder die Überlagerung zweier streng periodischer Zungenpfeifentöne im Abstand einer 12-temperierten Quinte – kann also in eindeutiger Weise in seine Sinuskomponenten zerlegt werden.

Im Unterschied zu den realen Tönen aber haben auch die quasiperiodischen gleich wie die periodischen Klänge eine unendliche Dauer. Zu den quasiperiodischen Funktionen gehören deshalb ebenfalls Nadelspektren. Im Unterschied zu den periodischen Klängen sind die Spektrallinien im Allgemeinen aber nicht äquidistant verteilt.



Zeitsignale für harmonische und inharmonische Spektren im Vergleich. Die Amplituden der Teiltöne nehmen mit der Ordnungszahl in beiden Fällen wie $1/n$ ab. Im unteren Beispiel ist der 15-te Teilton einen Halbton zu hoch, so dass er mit dem 16-ten des oberen Signals übereinstimmt [vgl. Anhang [C] und [D]].

8.3. Grenzen des Superpositionsgesetzes

Um den Rahmen einer reinen Frequenztheorie nicht zu verlassen, wird von den Vertretern einer reinen Ortstheorie in Situationen, in denen die ursprüngliche spektrale Zusammensetzung der Klänge mit ihrer Wahrnehmung unvereinbar zu sein scheint, eine nicht

lineare Übertragung, ein verfälschter Signalverlauf, angenommen. Als Folge der Verzerrung ändert auch die spektrale Zusammensetzung.

Das ursprüngliche Schallsignal kann dabei an verschiedenen Stellen der Übertragungskette verfälscht werden. Bei mehreren simultanen Schallquellen kann das Summensignal des Schalldruckverlaufs bereits in der Luft deformiert sein. Dann ist das Spektrum des objektiven Schalldruckverlaufs, der das Trommelfell trifft, nicht die „Summe“ der Spektren der je einzeln übertragenen Schälle, denn der Schalldruckverlauf der Superposition ist nicht die Summe der Schalldruckverläufe seiner Komponenten. Weitere Verzerrungen können aber auch bei der mechanischen Übertragung zwischen Trommelfell und Schnecke auftreten, derart dass der durch das Gehör zu analysierende Schall ein andere spektrale Zusammensetzung hat als am Gehöreingang.

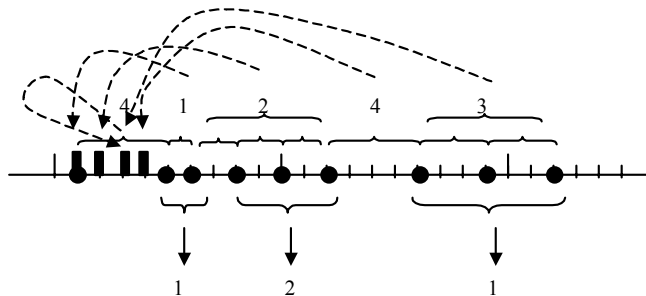
Es geht also um Situationen, in denen das Superpositionsprinzip nur eine schlechte Näherung ist [vgl. Kap. 4.2]. Die Überlagerung zweier Schwingungen ist dann nicht bloss die Summe der beiden Einzelschwingungen (die linearen Terme), sondern es treten weitere quadratische und höhere Terme auf. Dadurch kommen aus Sicht des Spektrums – schon bei der Überlagerung von Sinustönen – neben den Primärfrequenzen sekundäre Sinuskomponenten ins Spiel. Für solche Kombinationstöne, wie die von Tartini und Sorge beschriebenen Differenztöne, fehlte zur Zeit von Ohm und Seebeck noch eine überzeugende Erklärung. Die hier skizzierte und heute akzeptierte Deutung stammt von Helmholtz [vgl. Kap. 4.2.4]. Durch die Berücksichtigung der Verfälschung bei der Schallübertragung erhielt die Ohmsche Behauptung einen neuen Referenzpunkt. Fortan wird nämlich das Frequenzspektrum des deformierten Schalls in der Schnecke mit den zugehörigen Empfindungen verglichen, und nicht dasjenige der Schallquelle(n) oder dasjenige am Gehöreingang. Das Ohmsche Gesetz ist in dieser Sicht äquivalent zu einer reinen Ortstheorie der Frequenzverarbeitung auf der Basilarmembran.

Die Kontroverse zwischen Ohm und Seebeck wurde von Helmholtz in seiner *Lehre von den Tonempfindungen* 1863 wiederaufgenommen und mündete in eine differenzierte Stellungnahme zu Gunsten der Auffassung von Ohm [vgl. Kap. 5.7 und Kap. 6.2]. Für Helmholtz wurde dabei aus Ohms Gesetz die Behauptung, dass die gegenseitige Phasenlage der Partialtöne für die Klangfarbenwahrnehmung bei periodischen Klängen – unter gewissen einschränkenden Bedingungen – keine Rolle spiele.

Im Streit um die Helmholtz unterstellte „Phasentaubheit“ wird bis um 1900 von Koenig, Helmholtz, Lord Kelvin, und ter Kuile mit Stimmgabeln, Helmholtz-Resonatoren, Sirenen und Phonographen gefochten. Dabei ist Hermann pro Helmholtz, Koenig, Kelvin und ter Kuile kontra. Letztere knüpfen demnach an die Linie Euler, Willis, Seebeck an. Hermann argumentiert mit Signalspiegelungen am Phonographen (Vertauschung der elektrischen Polaritäten und Änderung der Drehrichtung), um zu zeigen, dass bei stationären Klängen die Klangempfindung unter Anwendung der Kontrapunktsymmetrien, Krebs, Umkehr und Umkehrkrebis invariant sei. Diese behaupteten Symmetrieminvarianten gelten inzwischen als widerlegt [Craig, Jeffress 1962; Pressnitzer, McAdams 1999, vgl. Kap. 6.13 und 6.15].

Es hat sich auch gezeigt, dass das von Seebeck erstmals behauptete Phänomen der Grundtonverstärkung durch entfernte Obertöne nicht ausschliesslich mit nicht-linearen Effekten erklärt werden kann. Schouten führt um 1940 für solche Töne die Bezeichnung Residuum ein. Die Bezeichnung Periodikton erweist sich dabei als irreführend, da die empfundene Tonhöhe von der Periodizitätstonhöhe abweichen kann (pitch-shift-Effekte [Kap. 6.12.2]). Residualtöne werden heute auf die Interaktion von höheren Teiltönen innerhalb eines

kritischen Bandes zurückgeführt. Die zugehörige Tonhöhenempfindung wird dabei auf der Basilarmembran an den „Resonanzstellen“ der Obertöne und nicht am Ort der Grundfrequenz verursacht. Seebecks Grundtonverstärkung wird also in Form einer Vielheit von, an verschiedenen Stellen lokalisierbaren, koexistierenden Tönen mit gleicher Tonhöhe manifest.



Differenz und Residualtöne an einem harmonischen Klang aus 9 Teiltönen. Die fetten Punkte symbolisieren die harmonischen Teiltöne mit den Ordnungszahlen 1, 5, 6, 8, 10, 12, 16, 19, 22 des äusseren Schallspektrums. Die fetten Balken stellen die Differenztöne erster Ordnung zwischen benachbarten Teiltönen dar: Sie existieren auf der Basilarmembran. Das heisst der Differenzton 1 steht mit dem Grundton in Interferenz (Verstärkung und Abschwächung sind also möglich). Die Differenztöne ergänzen das subjektive Spektrum mit den Teiltönen 2, 3, 4. Zusätzlich können die Residualtöne 1 an zwei verschiedenen Stellen und der Residualton 2 entstehen (im unteren Teil der Grafik). Die Tonhöhe 1 kann also gleichzeitig an drei Orten vorhanden sein. Dass die Residualtöne nicht mit realen Tönen der Basilarmembran in Interferenz treten, beweist, dass sie nervösen Ursprungs sein müssen.

Auch subjektive Obertöne sind wie die Differenztöne auf der Basilarmembran real vorhanden, sie entstehen gemäss Békésy [1934] erst in der Perilymphe und nicht schon bei der mechanischen Übertragung im Mittelohr wie die (subjektiven) Differenztöne. Die Berücksichtigung dieser Effekte zeigt die Unterschiede zwischen den mathematischen Verfahren der Spektralanalyse und der Art wie der menschliche Hörsinn Klänge analysiert. Auch das Verfahren der (kontinuierlichen) Fouriertransformation kann nicht in direkter Weise auf den Hörvorgang übertragen werden. Überdies ist durch solche Modelle über die Syntheseleistung der höheren Hirnzentren, die uns erlauben, die beiden Töne einer Klarinette und einer Violine im Quintabstand gleichzeitig zu erkennen, noch überhaupt nichts ausgesagt.

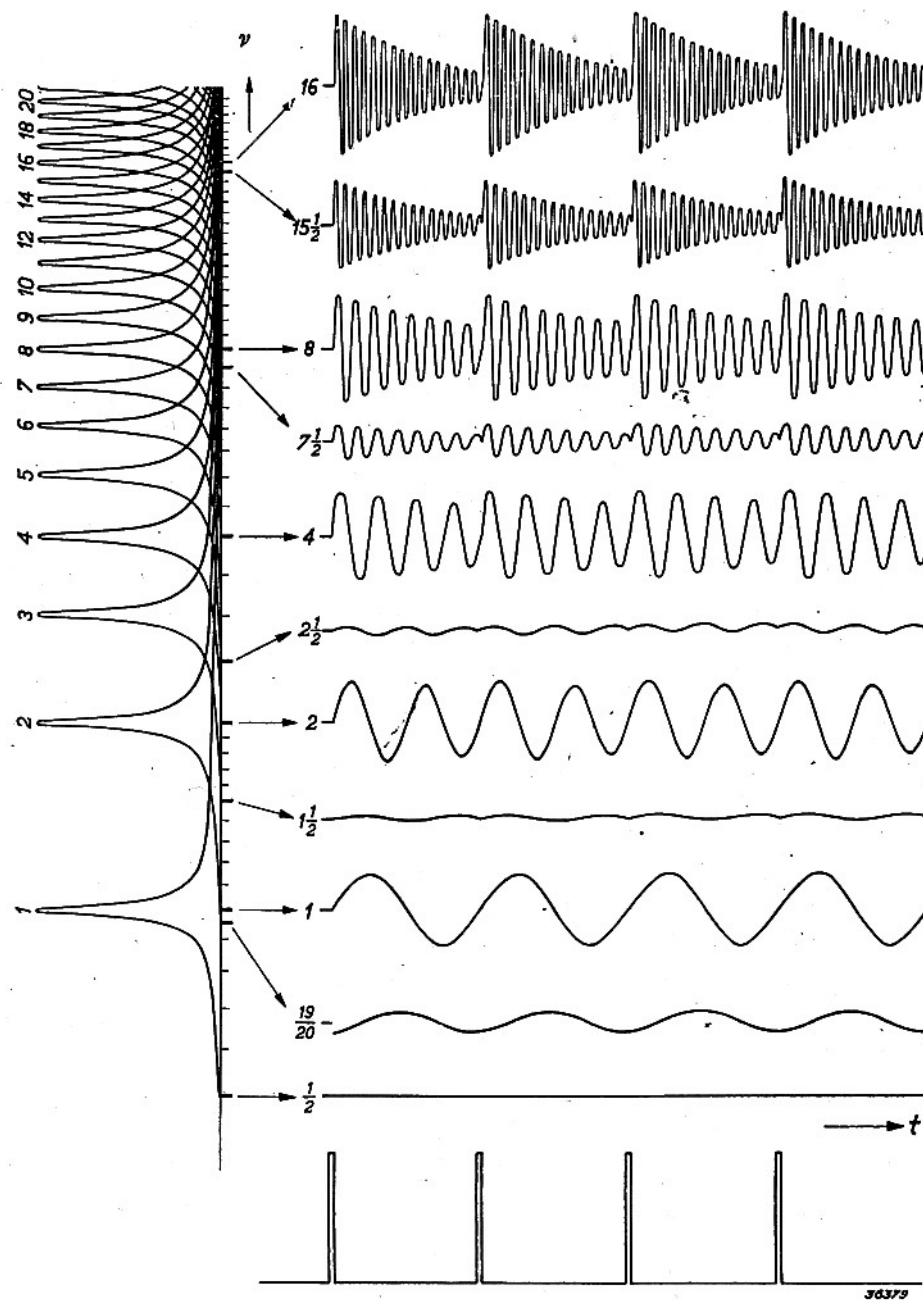
8.4. Verfahren der Spektralanalyse

Für nicht dauerhafte Tönen ist der Satz von Fourier in seiner ursprünglichen Form nicht direkt anwendbar. In der Regel wird deshalb nur der *stationäre Teil* eines Tons analysiert und man tut so, als ob sich die dort feststellbare Schwingungsform beidseitig ins Unendliche, in die Vergangenheit und in die Zukunft, mit der Periode der Grundfrequenz wiederholte. So sind die Anwendungen von Ohm, Helmholtz und auch diejenigen der diskreten Fouriertransformation gedacht.

Der Situation endlicher Signale sind andere Verfahren der Spektralanalyse adäquater. Zu nennen sind Fouriertransformation, Cosinustransformation Laplacetransformation, diskrete Fouriertransformation, Wavelettransformationen. Letztere werden der Teilchenauffassung von Photonen als Wellenzüge mit endlichem Träger besonders gut gerecht und sind im

Zusammenhang mit der Kompression von Audiodaten und Rauschfilterungen äusserst nützlich, insbesondere auch weil für ihre Berechnung effiziente Algorithmen vorliegen. Allen diesen Verfahren gemeinsam ist ihre Invertierbarkeit. Das heisst der *Input* einer solchen *Transformation*, das Zeitsignal eines Klanges, ist aus dem *Output*, dem transformierten Signal oder seiner Frequenzdarstellung, durch Anwendung der zugehörigen *Umkehrtransformation* verlustfrei rekonstruierbar. Bei nicht verlustfreien Kompressionen hingegen werden bei der Rekonstruktion gewisse bei der Transformation berechnete Fluktuationen vernachlässigt.

Bei den Zeitsignalen ist zu unterscheiden, ob sie kontinuierlich oder diskret gedacht sind. Im Falle der Analogsynthese durch Superposition von Oszillatorschwingungen ist eine kontinuierliche Betrachtung möglich und sinnvoll. Damit korrespondierende *mechanische* und *elektroakustische* Analyseverfahren basieren auf *Frequenzfiltern*: Um die Amplitude eines bestimmten Teiltons in einem (reproduzierbaren) Klang zu finden, werden durch mechanische oder elektrische Filter alle nicht interessierenden Frequenzen ausgeblendet. Da der Durchlassbereich eines physikalischen Filters immer ein ganzes Frequenzintervall ist, werden im übrigbleibenden Klang, falls nur ein Teilton durchgelassen wird, seine Frequenz- und Amplitudenschwankungen sichtbar. Falls dagegen mehrere Töne des zu analysierenden Schalles in den Durchlassbereich fallen, wird die Gesamtwirkung, ihre Summenfunktion, sichtbar. Die sogenannten Terzsieboszillogramme, zerlegen den interessierenden Frequenzbereich in Intervalle von der Grösse einer grossen Terz und zu jedem dieser Frequenzbereiche gehört ein Bandpassfilter, die zusammen eine Filterbank bilden. Wird die Schallenergie gleichmässig auf die parallel geschalteten Bandpassfilter der Filterbank verteilt, so wird der zu analysierende Schall in Komponenten der Breite einer grossen Terz zerlegt. Die Wahl der grossen Terz ergibt sich aus der Beobachtung, dass Töne üblicher Lautstärken, die mehr als eine grosse Terz auseinander liegen, auf weiten Strecken des Hörbereichs unabhängig von einander von der Basilarmembran in die Nervenbahnen übertragen werden. Bei kleineren Abständen ist aber mit hörbaren Interferenzerscheinungen zu rechnen.



Links über einer vertikal gezeichneten logarithmischen Frequenzskala, sind die Reizkurven der Basilarmembran, die sich aus den je einzeln dargebotenen Teiltönen des unten gezeichneten Rechteckimpulstons ergeben, dargestellt. Sie werden als Bandpassfiltersystem interpretiert, das exakt auf die Teiltonfrequenzen eingestimmt ist. Die über dem Rechteckimpulston gezeichneten Zeitfunktionen stellen die Reaktion von Resonatoren dar, die auf die relativen Eigenfrequenzen 0.5, 0.95, 1, 1.5, 2, 2.5, 4, 7.5, 8, 15.5, 16 eingestellt sind. Die obersten vier dieser Antwortsignale lassen die Grundfrequenz, da sie den Überlappungsbereich mehrer Filter auswerten, deutlich als Hüllkurvenperiodizität erkennen. Die Residualtonerkennung und Rauigkeitsauswertung beruht gemäss Zeittheorien auf einer Auswertung der Hüllkurven und eventuell der Feinstruktur derartiger Signale. Analoge Frequenzanalyseverfahren wie die Terzsieboszillographie zeigen ähnliche Reaktionsmuster [Quelle: Schouten 1940b, 300]

Sind die Zeitfunktionen hingegen nur zu diskreten Zeitpunkten bekannt, macht eine Interpretation mit Hilfe von kontinuierlichen Sinusschwingungen immer auch eine Annahme

über den Signalverlauf zwischen den Abtastwerten (Interpolation). Die Verfahren der diskreten Fouriertransformation beziehen sich auf diese zeitlich diskretisierten (trigonometrischen) Signale. Die verlustfreie Rücktransformation aus dem Spektrum gibt nur die Abtastwerte zurück. Die Genauigkeit hängt immer von der Zahl der Abtastwerte pro Zeitintervall, der Abtastfrequenz, ab. Das Abtasttheorem besagt, dass die Abtastrate mindestens so doppelt gross wie die höchste interessierende Frequenzkomponente sein soll (z. B. 40 000 Hz).

8.4.1. Fourieranalyse von Klängen im 19. Jahrhundert

Der Satz von Fourier liefert zu einem periodischen Klang, einer mathematischen Funktion, die Liste seiner Teiltöne, sowie ihre Amplituden a_n und ihre Phasen φ_n , aus denen der Zeitverlauf rekonstruiert werden kann. Damit die Rekonstruktion aus den beiden Listen möglich ist, muss vorausgesetzt werden, dass der Klang streng periodisch ist und dass die Grundfrequenz ν bekannt ist. Insgesamt gehören also zu einem periodischen Zeitsignal die Grundfrequenz und zwei Folgen von Kennzahlen:

$$\text{periodische Schwingung} \leftrightarrow \left(\nu, \begin{pmatrix} a_n \\ \varphi_n \end{pmatrix} \right) \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

Ausschliesslich in dieser Form wird Fourieranalyse von Klängen im 19. Jahrhundert betrieben. Ohm, Seebeck, Brandt, Helmholtz, Koenig, Thomson, Hermann sind bei ihren Berechnungen von Frequenzspektren von Klängen auf diesen Spezialfall beschränkt. Andererseits können aber auch Spektren, Kennzahlenfolgen zu nicht harmonischen Frequenzverhältnissen betrachtet werden, und die Fouriersynthese, die Superposition, welche aus dem Spektrum das Zeitsignal rekonstruiert ist als Addition des Schwingungsverlaufs unproblematisch. Diese Situation ist schon seit Daniel Bernoulli als „in der Natur vorkommend“ erkannt und wird mit den Chladnischen Visualisierungen Allgemeingut. Ein zugehöriges Frequenzspektrum besteht aus drei Kennzahlenfolgen, der Folge der Teiltonfrequenzen ν_n , der Folge der zugehörigen Amplituden a_n und der Folge ihrer Phasen φ_n :

$$\begin{pmatrix} \nu_n \\ a_n \\ \varphi_n \end{pmatrix} \quad n = 1, 2, 3, \dots \mapsto \text{quasiperiodische Schwingung}$$

Falls dabei vorausgesetzt wird, dass die Teiltöne Sinusschwingungen sind, ist die Zeitfunktion eines solchen quasiperiodischen Klanges eindeutig bestimmt. Problematisch ist der umgekehrte Übergang, nämlich aus dem Zeitsignal die zugehörigen Teiltonfrequenzen zu bestimmen. Ein physikalisches System von einstellbaren Resonatoren, eine Filterbank, vollzieht eine solche Zerlegung auf mechanische Weise, auch für quasiperiodische Schwingungen. Die Basilarmembran spielt im Resonanzmodell von Du Verney [1683] / De Mairan [1737] / Helmholtz [1863] die Rolle eines solchen mechanischen Frequenzanalysators, bei dem harmonische Teiltonfrequenzverhältnisse nicht zwingend sind. Die Situation der quasiperiodischen Schwingungsvorgänge eng benachbarter Frequenzen wird seit Sauveur [1700] / Smith [1749] immer wieder studiert. Die zugehörigen Wahrnehmungskorrelate, die Schwebungen und die Rauigkeit, zeigen die Grenzen der Frequenzauflösung eines solchen mechanischen Systems, da statt mehrerer simultaner Töne konstanter Stärke „Einzeltöne“ mit fluktuierendem oder wie Helmholtz sagt *intermittierendem* Verlauf empfunden werden.

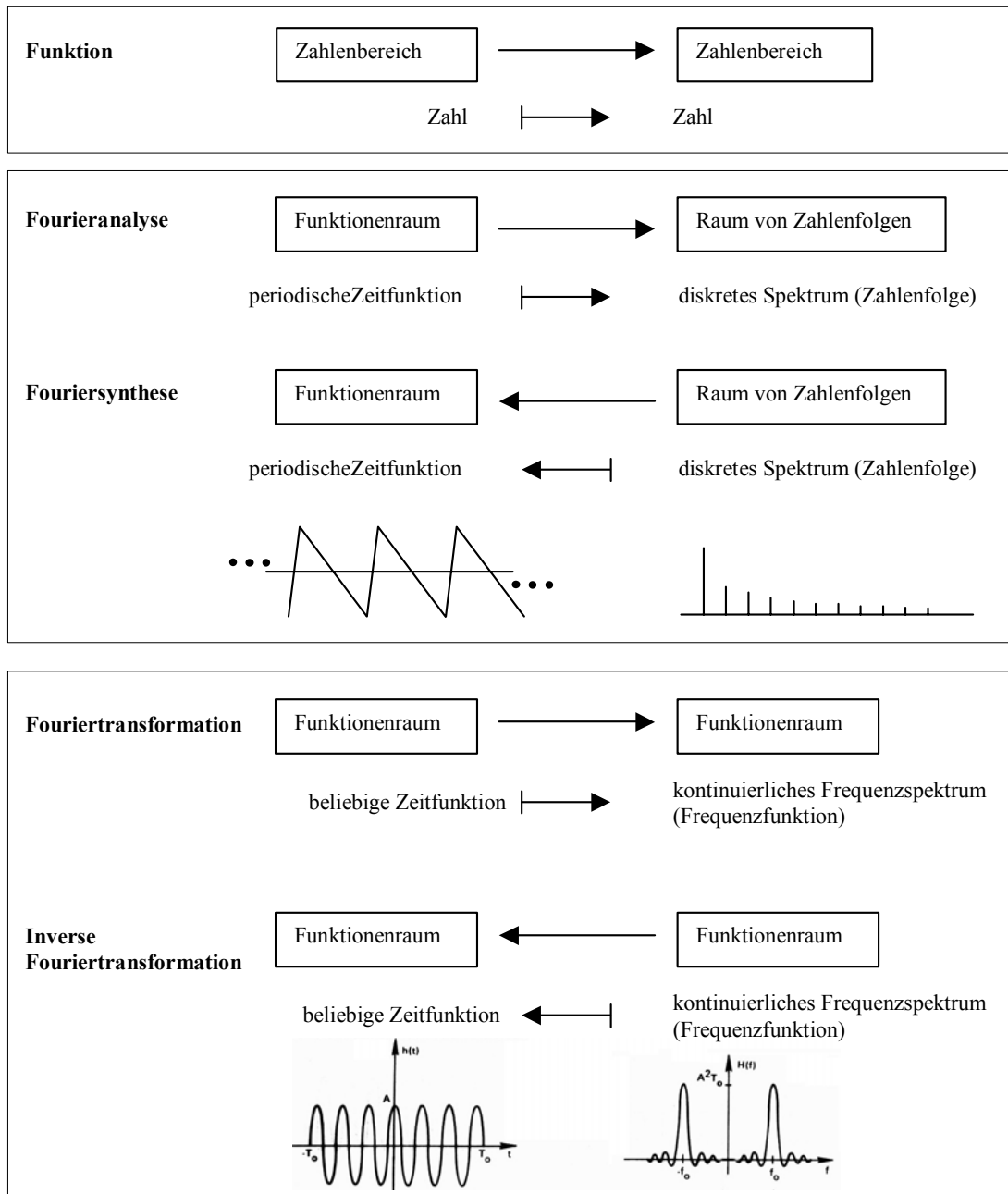
8.4.2. Die (kontinuierliche) Fouriertransformation

Die klassischen (kontinuierlichen) Integraltransformationen sind Zuordnungsvorschriften, so genannte Operatoren, die jeder kontinuierlichen Zeitfunktion eine ebenfalls kontinuierliche Frequenzfunktion zuordnen. Die Zeitfunktionen stehen dabei mit den Frequenzfunktionen in einer beidseitig eindeutigen Korrespondenz. Ein Operator ist eine Zuordnungsvorschrift zwischen Funktionenräumen.

Vergleichend mit der **Fourieranalyse** periodischer Klänge bedeutet die **Fouriertransformation** auf Seiten der Spektren den Übergang von Nadelpektren zu kontinuierlichen Frequenzverläufen. Ausgehend von der Fourieranalyse erhält man die Fouriertransformation, indem man die Periodendauer gegen ∞ (oder äquivalent dazu die Periodizität gegen 0) streben lässt, dabei geht, anschaulich gesprochen, die Summendarstellung der periodischen Funktion mit Hilfe ihrer Sinuskomponenten in eine Integraldarstellung über. Eine Funktion mit „unendlich langer Periodendauer“ ist in Wirklichkeit gar nicht periodisch, also können auf diese Weise beliebige Funktionen dargestellt werden.

Aus Sicht der kontinuierlichen Spektren ist das Nadelpektrum einer periodischen Funktion nur noch ein Spezialfall einer Frequenzfunktion, die bis auf einige ausgezeichnete Stellen immer den Wert 0 annimmt. Und die gewöhnlichen Schallsignale endlicher Dauer können in ihrem Frequenzbild in einem beliebig grossen Bereich wesentliche Komponenten haben.

Die Heisenbergsche Unschärferelation (1927) kann als Aussage über die Fouriertransformation gedeutet werden. Je kürzer ein Zeitsignal desto grösser ist seine Frequenzunschärfe, und umgekehrt je schärfer ein Signal im Frequenzbereich ist, desto länger dauert es: Es ist im Grenzfall nicht mehr in der Zeit lokalisierbar. Die Unschärferelation beschreibt die Doppelnatur des Lichts als Teilchen oder Welle.



Funktionen sind Zuordnungsvorschriften zwischen „Zahlenbereichen“. Ein Zahlenbereich darf dabei auch eine mehrdimensionale Struktur, z. B. ein Vektorraum sein.

Die Fourieranalyse einer periodischen Zeitfunktion kann als Zuordnungsvorschrift zwischen einem Funktionsraum und einem „Zahlenbereich“, dessen Elemente Zahlenfolgen sind, angesehen werden. Demgegenüber sind Integraltransformationen wie die Fouriertransformation Zuordnungsvorschriften (Operatoren) zwischen Räumen, deren Elemente je Funktionen sind. Bei der Fouriertransformation sind Zeitbild und Frequenzbild gleichwertige kontinuierliche Darstellungen eines Schwingungsvorgangs: Die Anwendung der inversen Fouriertransformation auf ein fouriertransformiertes Zeitsignal gibt das Zeitsignal verlustfrei zurück.

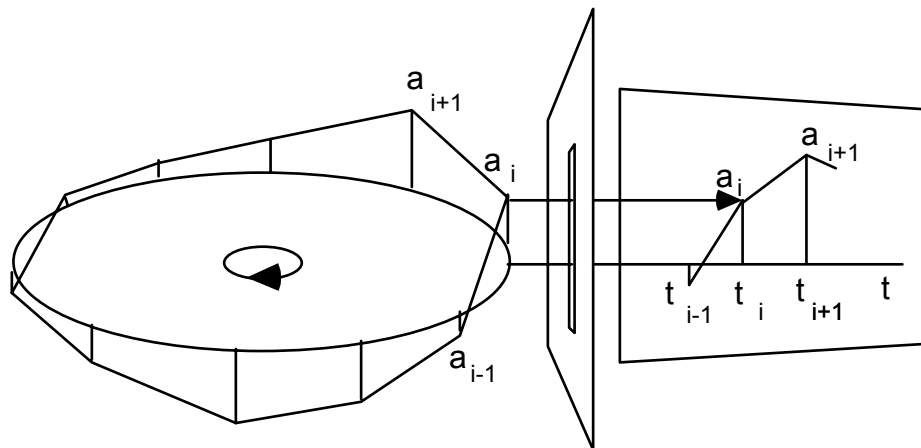
Fourier selbst soll bis an sein Lebensende am mathematischen Problem der Fouriertransformation allgemeiner Funktionen gearbeitet haben [vgl. <http://me.oregonstate.edu/classes/me452/winter95/ButlerKeithMurphy/> (Juli 03)> und <http://www-gap.dcs.st-and.ac.uk/~history/Mathematicians/Fourier.html>].

Der *Träger* einer reellen Funktion (Zeitfunktion oder Spektralfunktion) ist derjenige Teil des Definitionsbereichs, für den sie von 0 verschiedene Werte annimmt. Ausserhalb ihres Trägers nimmt sie also überall den Wert 0 an. Der Träger einer periodischen Schwingung ist die ganze Zeitachse. Die Fouriertransformierte der Sinusschwingung aber nimmt nur an der Stelle ihrer Frequenz einen von 0 verschiedenen Wert an, sie hat also einen punktförmigen Träger. Man sagt, die frequenzscharfe periodische Sinusschwingung sei in der Zeit unscharf oder nicht lokalisierbar. Umgekehrt wird ein in der Zeit lokalisierbares Signal, ein Zeitsignal mit endlichem Träger, in der Frequenz unscharf. Je kürzer ein Ton ist, desto unschärfer ist seine Frequenz im Lichte der Fouriertransformation. Dies ist auch dann der Fall, wenn die Nullstellen streng periodisch sind und das Signal als Produkt einer Sinusschwingung und einer einfachen Hüllkurve dargestellt werden kann. Dieser Sachverhalt über die Fouriertransformation wird in seiner physikalischen Deutung zur Heisenbergschen Unschärferelation (1927). Die Beobachtung, dass die Dauer eines Tones über die Bestimmbarkeit seiner Tonhöhe entscheidet, wird ohrenfällig, wenn von einer Sinusschwingung nur wenige Perioden dargeboten werden. Ganz klar wird die Tonhöhe erst, wenn der Ton genügend lange dauert. Die Bedeutung der Unschärferelation für die Akustik wurde bereits in den 30-er Jahren diskutiert und kann als Evidenz für die Wirkungsweise des Gehörs als approximativer mechanischer *Fouriertransformator* angesehen werden [Stewart 1931, Kock 1935].

8.4.3. Diskrete Fouriertransformation

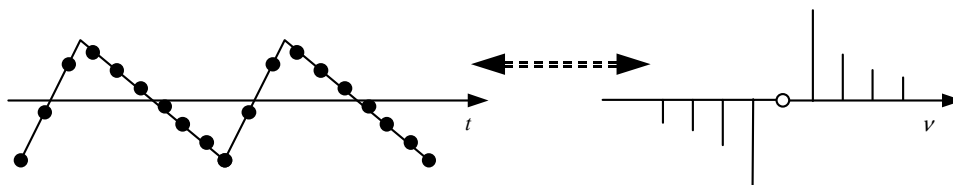
Die Verfahren der *diskreten* Fouriertransformation sind geeignet, Spektren zu abgetasteten (digitalisierten) *periodischen* Signalen einer Frequenzanalyse zu unterwerfen. Zu endlich vielen Abtastwerten einer Schwingungsperiode, werden dabei ebenfalls diskrete Spektren ermittelt, aus denen das digitalisierte Signal rekonstruiert werden kann. Ist die *Abtastrate*, die Zahl der gleichmässig verteilten Stützpunkte pro Periode, eine 2er-Potenz, so ist die so genannte schnelle Fouriertransformation (Fast Fourier Transformation, FFT) ein effizientes Verfahren der Spektralanalyse. Anfänge der diskreten Fouriertransformation gehen, wie bereits erwähnt, auf Gauss zurück.

Unterwirft man einen nullstellenperiodischen Klang mit zwischen den Nulldurchgängen variablem Verlauf „periodenweise“ einer diskreten Fouriertransformation, so kann dadurch die Zeitabhängigkeit seiner spektralen Zusammensetzung, seine Spektraldynamik, rechnerisch erfasst werden.



Diskretisierung einer periodischen Funktion. Links wird eine 2π -periodische Funktion auf einer mit konstanter Geschwindigkeit rotierenden Kreisscheibe veranschaulicht. Eine volle Umdrehung ($360^\circ = 2\pi$) entspricht dabei einer Periode. Die Frequenz ist die Anzahl Umdrehungen pro Sekunde. Die Auslenkungen a_j zu den Stützstellen t_j sind senkrecht zur Kreisscheibe eingezeichnet. Der Verlauf der Funktion wird durch einen Schlitz beobachtet. Die Aufzeichnung der Auslenkung ergibt dabei ein periodisches Muster.

Der Anwendungsbereich der diskreten Fouriertransformation für periodische Klänge besteht beidseitig aus Zahlenfolgen, denn die Samplewerte bilden eine (endliche) Zahlenfolge. Die diskrete Fouriertransformation ist also ein Operator zwischen Zahlenfolgen.

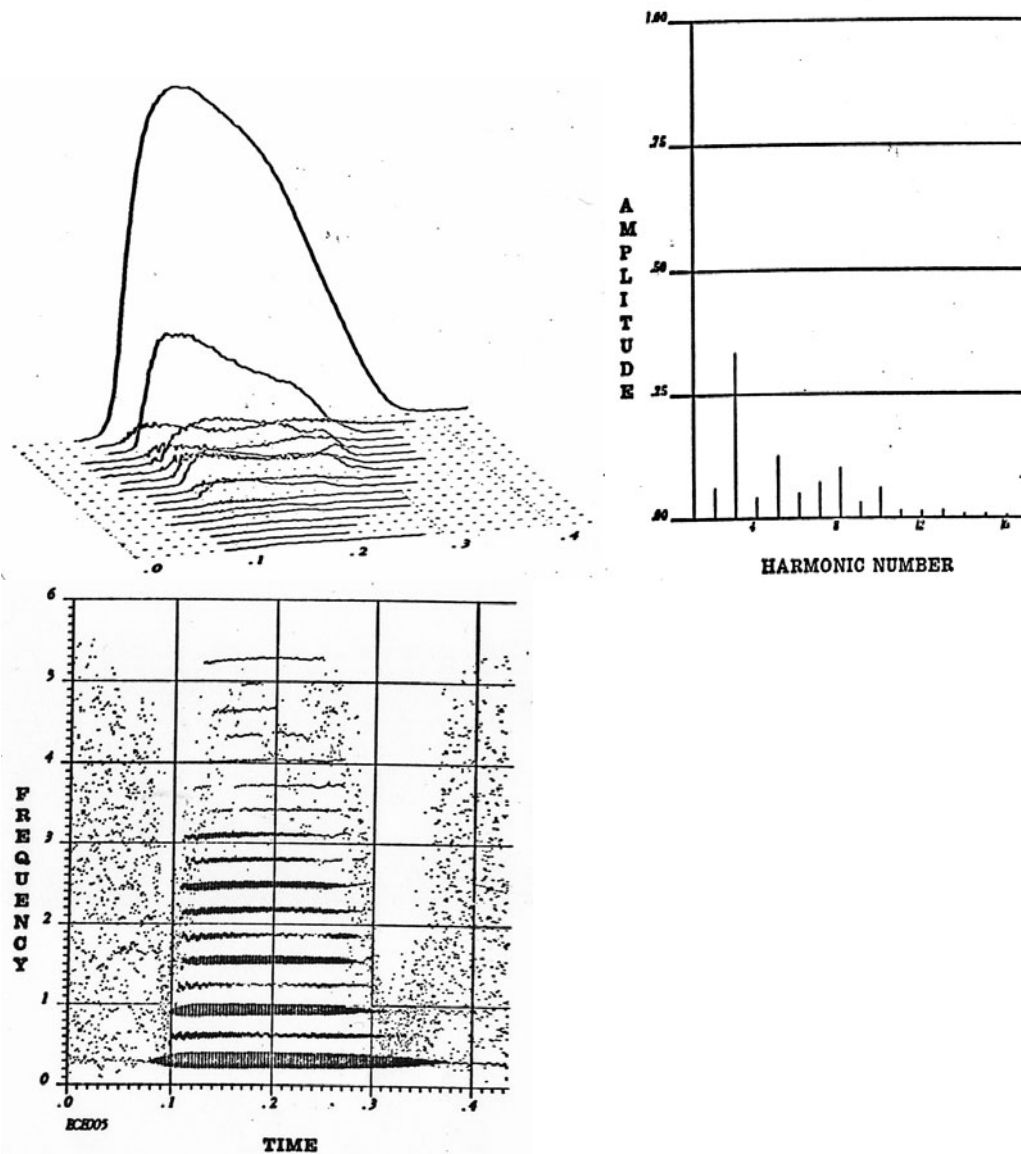


Diskrete Fouriertransformation periodischer Töne. Sowohl Zeit als auch Frequenzfunktion stellen diskrete Zahlenfolgen dar. (Die negativen Frequenzen im Frequenzbild ergeben sich aus der Euler'schen Formel $e^{ix} = \cos(x) + i \sin(x)$. Die Teiltöne sind als komplexe Exponentialfunktionen auf dem Einheitskreis anzusehen.)

Solche diskrete Verfahren bedeuten entweder eine diskrete Weltansicht mit einer gequantelten Zeit und diskretisierten Prozessen oder aber eine Approximation an eine kontinuierlich gedachte Wirklichkeit mittels diskreter, rechnerisch bewältigbarer Modellierung: Die Positionen von Pythagoras und Euklid kommen in verändertem Kontext erneut zum Vorschein.

Das von Grey 1975 angewandte Verfahren der Vermessung von Instrumentaltönen, ist ein der diskreten Fouriertransformation ähnliches diskretes Verfahren, das aber auf die Situation zugeschnitten ist, bei der die Teiltonfrequenzen geringfügig von den ganzzahligen Vielfachen der Grundfrequenz (die der wahrgenommenen Tonhöhe entspricht) abweichen dürfen. Die

untersuchten Instrumentaltöne werden also als diskretisierte quasi-periodische Funktionen aufgefasst. Die im Experiment verwendeten Testklänge werden auf Basis derartiger Daten synthetisiert [vgl. Kap. 7.4.1]. Grey weist darauf hin, dass die verwendete Modellierung eine Ambiguität zwischen Frequenz- und Phaseninformation aufweist. Eine kleine konstante Frequenzverschiebung kann alternativ auch als modulierende Phase auf der Ursprungsfrequenz gedeutet werden.



Verschiedene Darstellungen des gleichen Tons. Die Landschaftsdarstellung zeigt den Amplitudenverlauf der einzelnen Teiltöne (Grundfrequenz hinten). Frequenzabweichungen der Teiltöne von den ganzzahligen Vielfachen der Grundfrequenz kommen in der Darstellung nicht zum Ausdruck. Das Amplitudenspektrum daneben zeigt die zeitlich gemittelten Amplitudenwerte für alle Teiltöne. Neben den kleinen Frequenzabweichungen wird in dieser Darstellung auch von der zeitlichen Entwicklung des Klangs abstrahiert. In der unteren Darstellung wird die Frequenz der Teiltöne durch den Mittelpunkt der Balken und die Intensität durch ihre Breite kodiert. Sie visualisiert also sowohl die Dynamik der Lautstärken als auch diejenige der Frequenz der Teiltöne. [Quelle: Grey 1975, 137-139]

Die Darstellung eines Tons als Landschaft erinnert an die globale Landschaftsinterpretation einer polyphonen Komposition bei Praetorius [Kap. 2.3.1]. In einer Remineszenz an die

harmonie universelle wird damit gleichsam die makroskopische Deutung der Musik in den Mikrokosmos ihrer Elemente, in die Töne, hineingetragen, vergleichbar etwa mit der Übertragung des Planetenmodells auf die Mechanik der Atome.

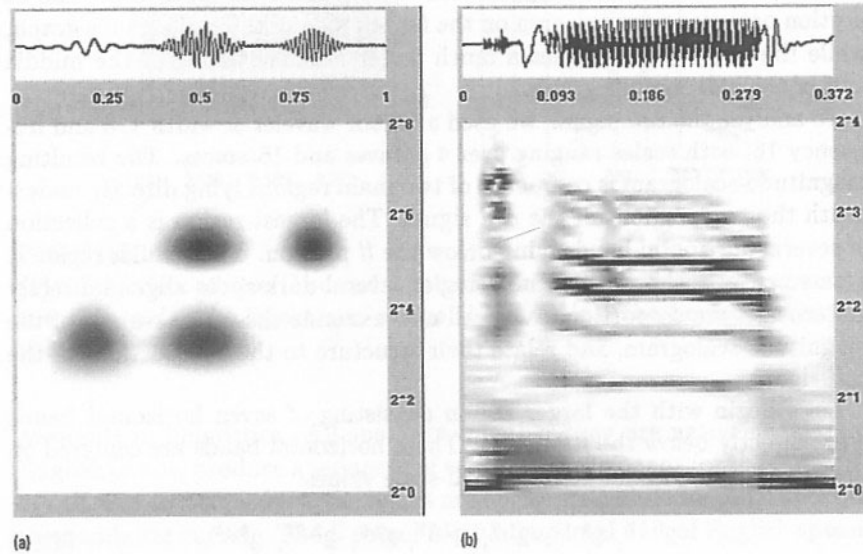
8.4.4. Wavelettransformationen

Die Wavelettransformationen gibt es in kontinuierlicher und in diskreter Form. Der Analyseansatz wird dabei etwas anders formuliert als bei den Fouriertransformationen. Es wird bei einer solchen Analyse untersucht, in welcher Form ein bestimmter Typ eines vordefinierten Oszillationsvorgangs, ein Wavelet, im zu analysierenden Schall vorhanden ist. Oszillationen des gleichen Typs sind in ihrem Zeitverlauf geometrisch ähnlich, das heisst sie können in Zeitrichtung gestreckt werden (Dilatation), was eine Änderung der Oszillationsfrequenz bewirkt, oder in der Zeit verschoben werden (Translation) ohne ihren Typ zu ändern. Aus numerischen Gründen werden mit Vorteil Wavelets mit einem endlichen Träger eingesetzt, das heisst ihr Definitionsbereich ist entweder ein endliches Zeitintervall oder er besteht aus endlich vielen diskreten Werte im Falle von diskreten Wavelets.



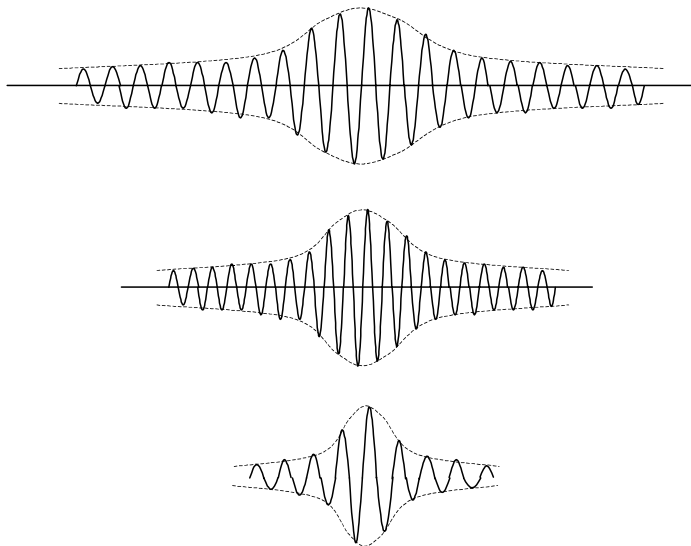
Beispiel für ein kontinuierliches „Mutter-Wavelet“ mit endlichem Träger: Mexican Hat Wavelet
[Quelle: Walker 1999:131]

Bei der Analyse wird bei jedem Zeitpunkt, zu jeder Verschiebung des *Mutterwavelets* (des Prototypen), getestet wie gut die Dilatationen mit den Schallsignalausschnitten korrelieren. Eine Frequenz-Analyse mit Hilfe von Wavelets ist dann besonders für die Kompression von Audiodaten geeignet, wenn die spektrale Energie bei der Transformation auf möglichst wenige hervortretende Frequenzen verteilt wird. Diese optimal dichten Beschreibungen sind aber abhängig von der Wahl der zugehörigen Mutterwavelets und den zugehörigen Transformationen sowie von den Besonderheiten der zu untersuchenden Signale. Die Wahl des Wavelets stellt, um beim Bild des geometrischen Raumes zu bleiben, eine Entscheidung für ein Koordinatensystem unter vielen dar.



Gabor-Wavelet-Analyse [Quelle: Walker 1999:135]. Links Testsignale, rechts das gesprochene englische Wort *call*.

Die Gabor-Wavelets sind Sinusschwingungen die mit glockenförmigen Hüllkurven (Gausskurven) überformt sind. Je nach Kennzahlen der Gausskurve resultiert dabei mehr eine Impulsanalyse (bei kleiner Halbwertsbreite) oder die klassische Fourieranalyse, wenn die Halbwertsbreite gegen unendlich strebt. Das Verfahren wurde schon von Meyer-Eppler [1969] bezüglich Anwendbarkeit auf die Musik diskutiert.



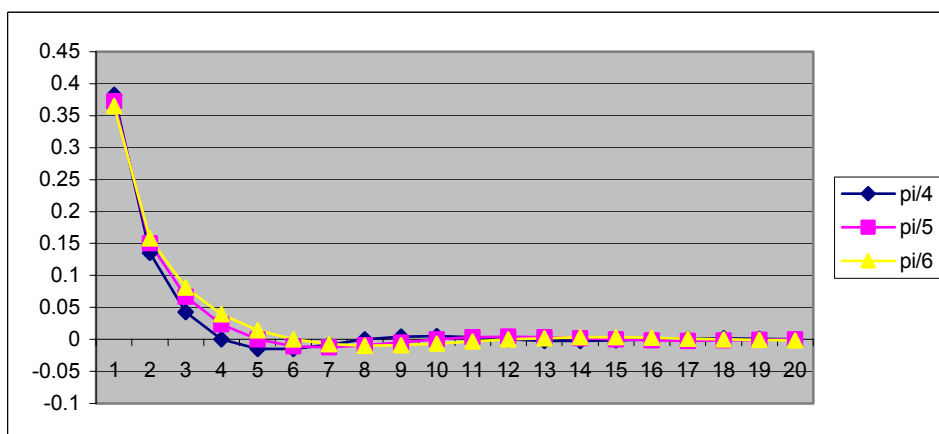
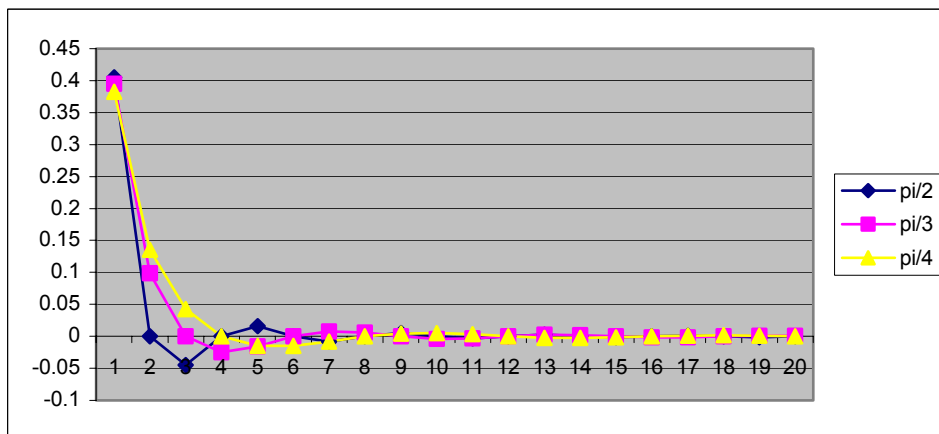
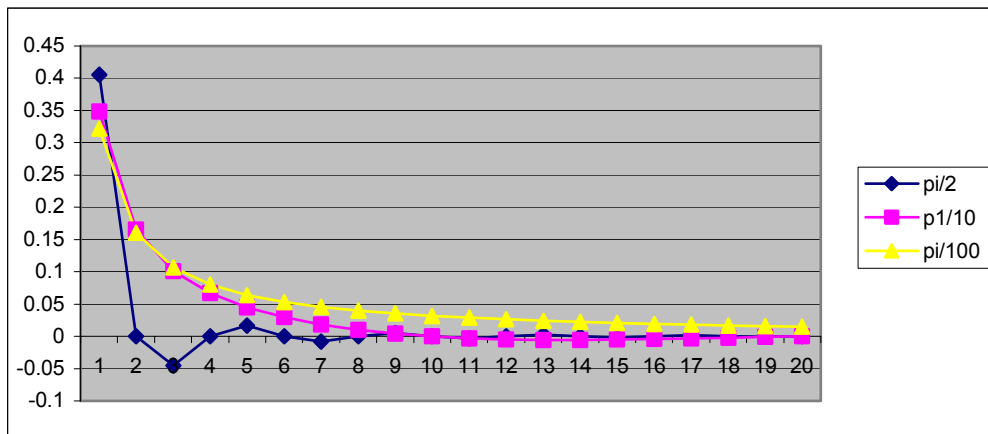
Gabor-Wavelets sind Sinusschwingungen, deren Hüllkurve eine Gauss'sche Glockenkurve ist. Je flacher die Glockenkurve ist, desto mehr gleichen die Produktschwingungen einer Sinusschwingung mit konstanter Amplitude. Die Gabor-Analyse konvergiert in diesem Fall gegen die klassische Fourieranalyse. Die Gabor-Wavelets haben einen unendlichen Träger.

Die Theorie der Wavelets hat sehr vielseitige Anwendungsgebiete auch in der Bildbearbeitung. Wavelet-Transformationen gibt es in grosser Zahl und sie haben den Zweck

den Grossteil der Energie eines Signals auf wenige spektrale Komponenten zu verteilen. Sie ermitteln die Frequenzen und ihre Kennwerte von selbst und sind in diesem Sinn adaptiv. Je nach Wavelet-Typ allerdings ergeben sich verschiedene Analysen und unterschiedliche minimale Repräsentationen des „wesentlichen Gehalts“ der zu analysierenden Zeitfunktionen. Es ist klar, dass derartige Transformationen keine direkten gehör- oder neurophysiologische Implikationen haben. Für die Spracherkennung sind sie aber wegen des Energierhaltungsprinzips, das ihnen zu Grunde liegt, sehr geeignet.

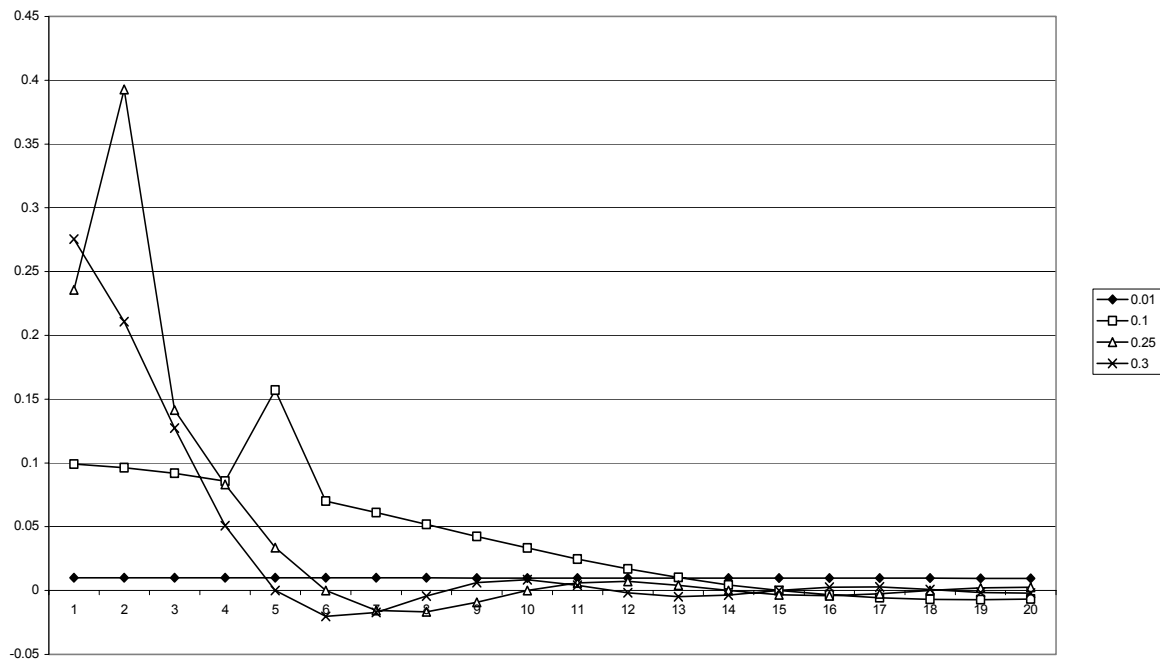
Anhang

[A] Amplitudenspektrum der gezupften Saite in Abhängigkeit von der Zupfstelle

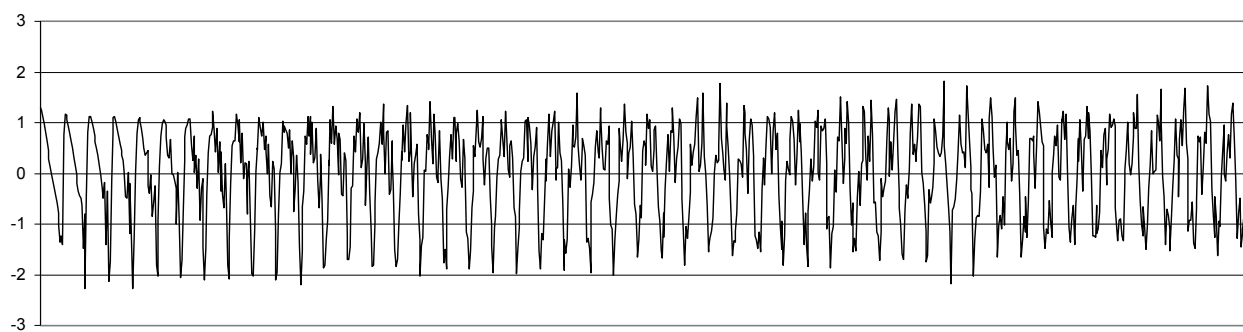
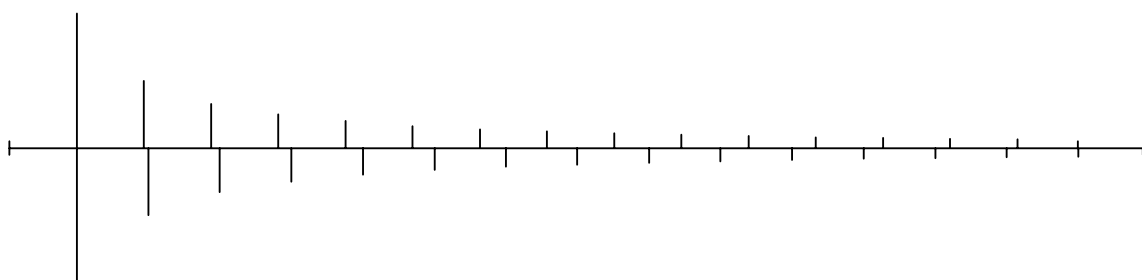
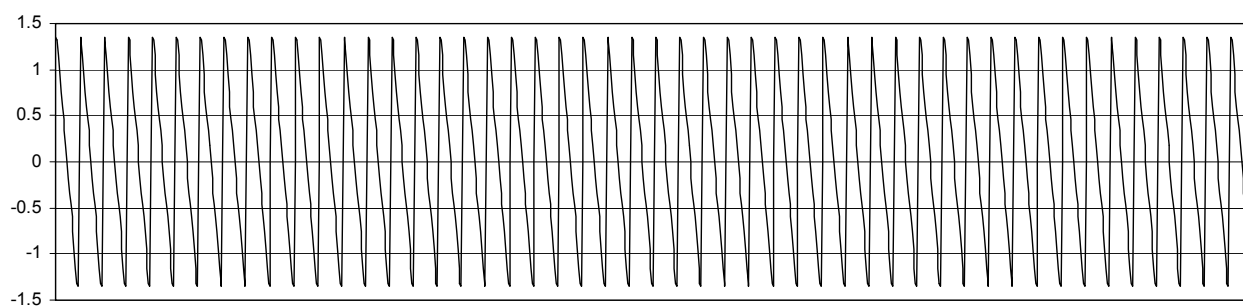


Die Amplitudenspektren sind mit den Formeln von Brandt [1855] berechnet, 2π entspricht der ganzen Saitenlänge. Die Verläufe zeigen periodisch den Wert 0 in Abhängigkeit von der Position. Bei $\pi/3$ beispielsweise, dem sechsten Teil der Saite, verschwinden der 6-te, 12-te, .. Teilton.

[B] Amplitudenspektren der Impulsfunktionen nach Ohm [1843] in Abhängigkeit vom Verhältnis zwischen Impulsbreite und Periodizität

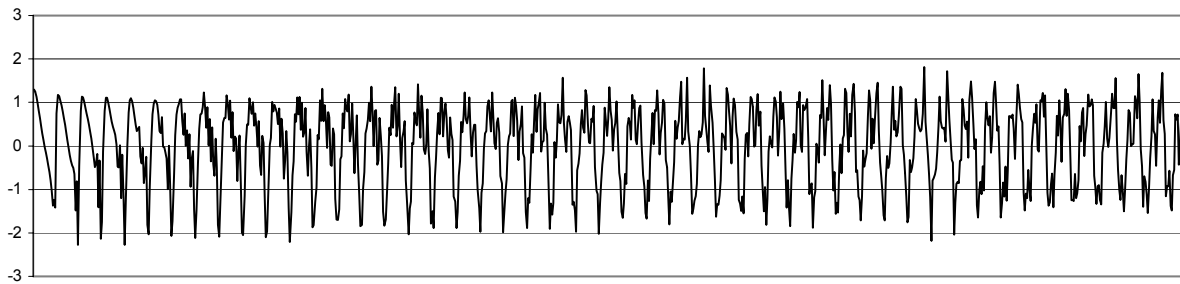


Die Spektren sind nach den Formeln von Seebeck [1843] berechnet. Die Grundfrequenz kann aber muss nicht dominieren. Je nach Wahl von τ/T ergibt sich ein rascheres oder weniger rasches Abklingen der höheren Teiltöne. Beim Verhältnis 0.1 ergibt sich ein auffällig starker fünfter Teilton.

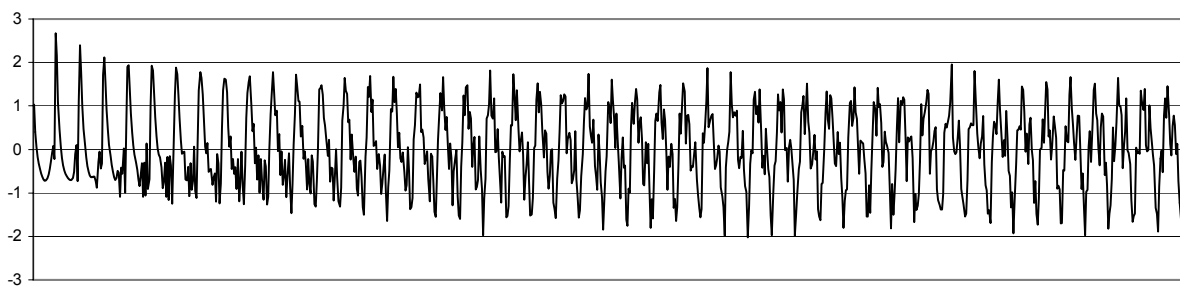
[C] Periodische und quasiperiodischer Klänge

Vergleich Zeitfunktion und Spektrum harmonischer und gleichmässig gestreckter quasiperiodischer Klang.

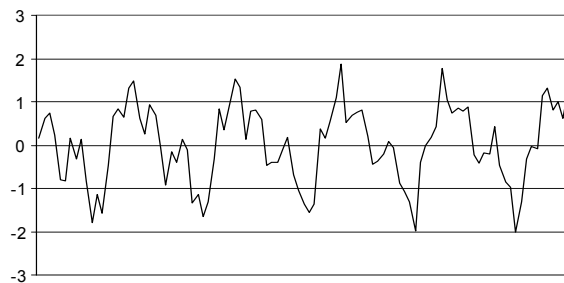
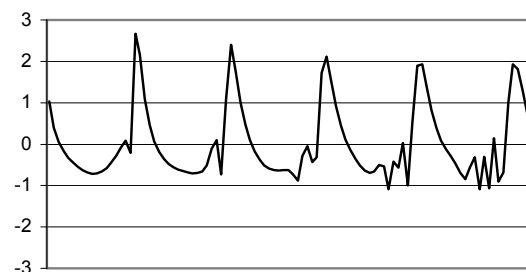
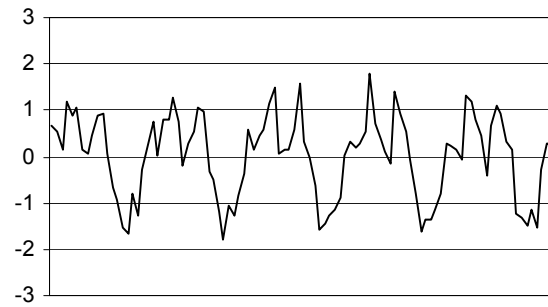
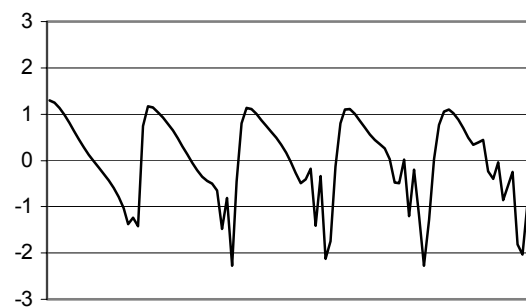
[D] Zeitfunktionen quasiperiodischer Klänge



Zeitfunktion bei logarithmisch gestrecktem Spektrum. 50 Perioden der Grundfrequenz, Schrittweite $\pi/10$, 16 Teiltöne mit $t_{16} = 15 * t_1$, Spektrum gleichmässig gestreckt, Amplituden $1/n$, Startphasen in Sinuslage



Zeitfunktion bei logarithmisch gestrecktem Spektrum. 50 Perioden der Grundfrequenz, Schrittweite $\pi/10$, 16 Teiltöne mit $t_{16} = 15 * t_1$, Spektrum gleichmässig gestreckt, Amplituden $1/n$, Startphasen in Cosinuslage



Detailansichten. Anfang und Mitte der obigen Beispiele, je 5 Perioden der Grundfrequenz, oben mit Start in Sinuslage unten mit Start in Cosinuslage. Die anfängliche Punktsymmetrie im oberen und die Achsensymmetrie im unteren Beispiel verflüchtigen sich im Verlaufe der Klänge. Die Amplitudenspektren sind in beiden Fällen die Gleichen.

[E] Mersenne und die Dimensionsfrage

Determiner si les Sons ont toutes sortes de dimensions, à sçavoir la longueur, la largeur et la profondeur, et qu'elles sont les autres proprietiez, ou les Accidens du Son.

Encore que les trois dimensions de la quantité se rencontrent seulement dans les corps à proprement parler, l'on peut neantmoins les remarquer dans les accidents corporels, particulièrement lors qu'ils suivent lesdites dimensions; et qu'ils frappent differemment les sens, quand la quantité ou la figure des corps est differente; ce qui arriue aux Sons, comme l'ay desia remarqué, car il sont minces & deliez, lors que les corps dont il sont produits sont minces & subtils: mais il sont gros & massifs, quand les corps sont grands & gros, comme l'on experimente aux chordes des instrumens, & aux tuyaux d'Orgues.

Or la premiere dimension, qui consiste dans vne simple longueur, ne peut estre considerée dans le Son qu'en deux manieres, a sçavoir quand il dure peu ou long-temps, ou quand il vient d'un corps fort petit, par exemple des chanterelles du Luth, & des moindres chordes de l'Epinette; de là vient qu'il penetre aisément, à raison qu'il est subtil comme le trenchant d'un couteau, & pointu comme vne aiguille.

La premiere maniere est le fondement de toutes les mesures, & le temps dont on use en la Musique, & dans la Rethorique, & consequemment dans la Rythmique des Anciens, qui varient les temps en vne grande multitude de manieres, comme ie monstrey ailleurs.

Quant à la largeur du Son, il est plus difficile de l'expliquer, d'autant que nous n'avons point d'instrumens qui consistent dans les largeurs differentes, qui ne soient quant & quant accompagnez de differentes profondeurs; neantmoins l'on peut dire que le Son est large, quand le corps d'où il vient est large, puis qu'il suit les affectations des corps par lesquels il est produit. Et puis le Son peut estre appelé plus large, lors qu'il est plus fort, comme il arriue lors qu'on chante en mesme ton vne fois plus fort que l'autre: quoy que cette difference appartienne plustost à la force du Son. Mais l'on peut encore trouver vne autre maniere de cette largeur dans l'épaisseur des Sons, qui consiste à estre remplis & plus massifs en mesme ton, ce qui arriue lors que le Dessus & la Basse chantent à l'unisson; car le Son de la Basse est beaucoup plus massif & plus remply; ce qui arriue tousiours aux voix des Basses, qui ne peuvent faire l'unisson avec le Dessus ou avec les autres parties, qu'elles ne soient plus pleines & mieux fournies. Ce qui se remarque semblablement aux chordes, dont la plus grosse a le Son plus large & plus pleine que la

Bestimmung ob die Töne alle Arten von Dimensionen, das heisst Länge, Breite und Tiefe, haben und welches die andern Eigenschaften oder Akzidentien des Tons sind.

Auch wenn sich die drei Dimensionen der Quantität im eigentlichen Sinne des Wortes (à proprement parler) nur in Körpern finden lassen, können sie dennoch in den körperlichen Akzidentien bemerkt werden, besonders wenn diese den genannten Dimensionen entsprechen, so dass sie die Sinne auf verschiedene Art schlagen, wenn die Grösse oder Gestalt der Körper verschieden ist; dies bewirkt für die Töne, wie ich schon bemerkt habe, dass sie dünn und fein sind, wenn die Körper, die sie hervorbringen, dünn und fein sind: aber sie sind gross und massiv, wenn die Körper gross und dick sind, wie man bei den Saiten der Instrumente und bei den Orgelpfeifen experimentiert.

Die erste Dimension, die in der einfachen Länge besteht, kann beim Ton nur auf zwei verschiedene Arten gedeutet werden, nämlich wenn er nur wenig oder lange Zeit dauert, oder wenn er von einem ziemlich kleinen Körper wie z. B. von den Quintensaiten (chanterelles) der Laute oder von den kleineren Saiten des Spinetts stammt; davon kommt es, dass er leicht eindringt, weil er dünn ist wie eine Messerklinge und spitzig wie eine Nadel. Die erste Art ist die Grundlage von allen Takten und Zeiten, von denen man in der Musik und in der Rhetorik und folglich auch in der Rhythmik der Alten, die die Zeiten in einer Vielzahl von Arten variiert, Gebrauch macht.

Was die Breite des Tons anbelangt, ist es schwierig zu erklären, umso mehr weil wir kaum Instrumente haben in verschiedenen Breiten, die nicht auch zugleich in verschiedener Tiefe vorliegen; trotzdem kann man sagen, dass der Ton breit ist, wenn der Körper, von dem er stammt, breit ist, ferner dass er den Affektionen (?= der Form ?= den Formänderungen) der Körper folgt, die ihn hervorbringen. Weiterhin kann der Ton breiter genannt werden, wenn er stärker ist, wie es geschieht, wenn man im gleichen Ton singt aber stärker: auch wenn dieser Unterschied mehr zur Stärke des Tons gehört. Aber man findet noch eine andere Art dieser Breite in der Dicke der Töne, die darin besteht, dass der gleiche Ton voller und massiver ist, was auftritt, wenn Bass und Oberstimmen in Einklang singen; denn der Ton des Basses ist viel massiver und voller; dies geschieht immer bei den Bässen, die den Einklang mit dem Sopran oder andern Stimmen nicht geben können, ohne dass sie voller und reichhaltiger sind. Dies bemerkt man auch bei den Saiten, bei welchen die dickere einen breiteren und volleren Ton hat als die dünnere, auch wenn sie im

moindre, quoy qu'elles soient à l'vnisson. Or bien qu'on puisse dire que cette qualité du Son appartient à la profondeur, puis qu'elle le rend plus massif & plus corpulent, neantmoins l'on reserve cette profondeur pour expliquer la grauité du Son, qui consiste dans la tardiveté du mouvement, & qui est cause que nous disons que la voix d'un homme qui fait la Basse, est creuse, basse & profonde, & qu'il à vn bon creux de voix.

C'est pourquoy l'on peut appeler le Son *profond*, ou *bas*, & *haut*, ou *aigu*, à raison des corps qui sont grands & gros, ou petits & minces; quoy que l'on puisse dire que le Son est d'autant plus gros, plus espais, & plus massif, qu'il est plus aigu, si l'on mesure cette epaisseur à la multitude des mouvements, comme l'on mesure la densité des corps, & e la lumiere à la multitude des parties & des rayons, puis que le Son est d'autant plus aigu qu'il est fait par vne plus grande multitude de mouuemens considerez en mesme temps. Mais nous parlerons encore de ces dimensions au traité des corps des instrumens qui produisent le Son. C'est pourquoy ie viens à ses autres accidens, qui sont quasi en aussi grand nombre que les differences exterieures des corps qui le produisent, dont il y a plusieurs proprietez que l'on n'a pas encore cogneu.

Or entre les qualitez du Son, qui toutes dependent de la maniere dont les corps pressent, froissent & frappent l'air, celles qui donnent le nom aux Sons aspres, aigres, rudes, doux, clairs, estouffez, &c. sont les principales apres le grave & l'aigu car quant aux autres qui portent le caractere des corps, par lesquels ils sont produit, l'on peut en establir vne science, à raison qu'ils vont presque à l'infiny: car si la surface d'un corps a vn sewul pore dans la surface qui ne soit pas dans la surface d'un autre corps, ils feront des Sons differents, encore qu'ils soit parfaitement semblables en toutes autres choses, d'autant que le pore qui est dans l'un, est cause que le corps frappe autrement l'air que s'il n'auoit point ledit pore. Il faut dire la mesme chose des petites concauites, ou eminences qui se rencontrent dans plusieurs corps, parce que l'effect est touiours different, quand la cause apporte quelque difference en sa production.

Quant à l'*aspreté* & à l'*aigreur* des Sons, elle vient de l'inesgalité de la surface des corps qui frappent ou qui divisent l'air, comme il arriue au bruit qu'on fait en limant du fer, comme il arriue au bruit qu'on fait en limant du fer, ou quelque autre metal: car la lime rompt l'air en autant de parties comme ell a de grains & d'eminences, & lors que l'air diuisé & rompu frappe les esprits du nerfs de l'ouye, il leur imprime son mouuement, qui leur

Einklang stehen. Man könnte diese Eigenschaft des Tons auch der Tiefe zuweisen, da sie ihn massiver und corpulenter macht, auch wenn man diese Tiefe (profondeur) dafür aufspart um die Tiefe (grauité) des Ton zu erklären, die in der Langsamkeit der Bewegung besteht und die der Grund ist weshalb wir sagen, dass die Stimme eines Mannes der den Bass gibt, hohl[?=*kräftig*], niedrig[?=*leise*] und tief ist, und dass er eine *kräftige* Stimme hat.

Deshalb kann man einen Ton *tief* oder *niedrig* und *hoch* oder *spitz*, wegen der Körper, die groß und dick, oder klein und fein sind; auch wenn man | sagen könnte, dass der Ton umso dicker, dichter und massiver ist, wenn er höher ist, wenn man diese Dichtigkeit an der Vielzahl der Bewegungen misst, wie man die Dichte der Körper misst und die des Lichts an der Vielzahl der Teilchen und Strahlen, da ja der Ton umso höher ist, wenn er aus einer grösseren Zahl Bewegungen bezogen auf die gleiche Zeit hervorgebracht wird. Wir werden auf diese Dimensionen in der Abhandlung der Körper der Instrumente, die den Ton hervorbringen, zurückkommen. Denn ich komme jetzt zu den anderen Akzidenzien, von denen es eine ebenso grosse Zahl gibt wie die äusseren Unterschiede der Körper, die ihn hervorbringen, von denen es mehrere Eigenschaften gibt, die man noch nicht gekannt hat [die noch unbekannt/unverstanden sind].

Unter den Qualitäten des Tons, welche alle von der Art, wie die Körper die Luft pressen, schütteln und schlagen, abhängen, sind diejenigen welche den Tönen die Bezeichnungen rau, bitter, roh, süß, hell, dumpf etc. geben, die hauptsächlichsten nach der Tiefe und Höhe: denn was die andern anbelangt, die den Charakter der Körper, durch welche sie produziert werden, kann man darüber eine Wissenschaft etablieren, denn sie gehen fast ins Unendliche: denn, wenn die Oberfläche eines Körpers eine einzige Pore in ihrer Oberfläche hat, welche in der Oberfläche eines andern Körpers nicht vorhanden ist, geben sie verschiedene Töne, auch wenn sie in allem Andern völlig übereinstimmen, sodass also die Pore die im einen ist, die Ursache dafür ist, dass der Körper die Luft auf andere Weise schlägt, als wenn er die genannte Pore nicht hätte. Das gleiche ist über kleine Ein- und Ausbuchtungen zu sagen, die sich in den verschiedensten Körpern vorfinden; denn der Effekt ist jedesmal anders, wenn die Ursache irgendwelche Unterschiede bei seiner Erzeugung nach sich zieht.

Was die *Rauigkeit* und *Bitterkeit* der Töne betrifft, kommt sie von der Unregelmässigkeit der Oberfläche der Körper, die die Luft schlagen und zerteilen, wie es geschieht beim Geräusch, das man beim Feilen von Eisen oder irgendwelchem andern Metall macht: denn die Feile bricht die Luft in ebenso viele Teile, wie sie Körner und Ausbuchtungen hat; und sobald die zerteilte und gebrochene Luft die Gehörnerven schlägt, prägt

donne autant de mesconement, comme les saueurs aspres à la langue, & comme les surfaces rudes, brutes & mal polies au toucher. De là vient que la prononciation des vocables que signifient cette qualité a quelque chose de mal plaisant, afin de représenter naïfvement ce qu'elle signifie, comme l'on aperçoit en prononçant (*brute, rude, aspre, &c.*) à cause de la lettre R. Mais ie parleray de la prononciation, & de la signification des paroles dans le liure de la Voix, où ie monstreray s'il peut y auoir vne langue naturelle.

La qualité de *rude* est difficile à expliquer dans les Sons, & particulièrement dans la Voix, d'autant que l'on ne void pas comme l'air se rompt, ou se diuisens dans le larynx & dans la glotte, ou dans le palais & dans les autres parties de la bouche de ceux qui ont la parole aspre & rude. Il semble neantmoins que toutes ces qualitez qui rendent les Sons mal plaisans, ne sont autre chose que la difformité des mouuements de l'air, dont le Son est doux, quand il se meut vniformement; & rude, aspre & aigre, lors qu'en mesme temps il se meut de deux, ou de plusieurs façons différentes; ce que l'on peut prouuer par le Son de deux ou de plusieurs flustes, ou tuyaux d'Orgues, qui sont vn peu esloignez de l'vnisson, car encore que leurs Sons pris en particulier & separément soient doux & agreables, neantmoins il sont rudes & desagregables quand on les assemble; parce que leurs mouuement frappent diuerse | ment l'oreille en mesme temps, & la tiraillent d'vn costé & d'autre; d'où il arriue que les esprits sont dissipés & deschirez, ou diuisez contre leur ordre, leur naturel & leur inclination.

L'aigre a par dessus le *rude* qu'il pique plus viuement le nerf de l'ouye, à raison de la vitesse des ses mouuemens & de la diuision de l'air plus menuë, particulièrement quand la force accompagne la vitesse, comme il arriue aux Sons esclatans de certains cornets, tuyaux & autres instruments, qui blessent l'oreille par leurs Sons trop forts & trop aigus. Mais il n'est pas icy necessaire de parler plus amplement de ces differences & qualitez du Son, d'autant que nous en dirons encore plusieurs choses dans les autres Liures. [Mersenn 1636/I, 28-30]

sie ihnen ihre Bewegung auf, welche ihnen ziemliches Missvergnügen bereitet wie die bitteren Geschmäcke der Zunge und wie die rauen, rohen und schlecht polierten Oberflächen dem Tastsinn. Von da kommt auch, dass das Aussprechen der Vokabeln, die diese Qualität zum Ausdruck bringen, etwas unangenehmes an sich hat, um auf naive Weise darzustellen, was sie bedeutet, wie man beim Aussprechen (*brute, rude, aspre* etc.) wegen des Buchstabens R feststellt. Aber ich werde von der Aussprache und Bedeutung der Wörter im Buch über die Stimme sprechen, wo ich zeigen werde, ob es eine natürliche Sprache geben kann.

Die Qualität des *Rauen* ist in den Tönen schwierig zu erklären, insbesondere in den Stimmen, umso mehr als man nicht sieht, wie sich die Luft in der Kehle oder Stimmritze oder im Gaumen und in den andern Teilen des Mundes, derjenigen, die eine bittere und raue Stimme haben, bricht oder zerteilt. Dennoch scheint es, dass alle diese Qualitäten, die die Töne unangenehm machen, nichts anderes sind als die Unförmigkeit der Bewegungen der Luft, wobei der Ton süß ist, wenn sie sich gleichförmig bewegt, und roh, rau und bitter, wenn sie sich zur gleichen Zeit auf zwei oder mehrere Arten bewegt; was man beweisen kann anhand des Klangs zweier oder mehrerer Flöten oder Orgelpfeifen, die ein wenig vom Einklang abweichen, denn ihre Töne einzeln genommen sind süß und angenehm, aber rau und unangenehm, wenn man sie zusammenbringt, weil ihre Bewegungen das Ohr gleichzeitig verschieden | schlagen und es von einer Seite zur andern ziehen. Davon kommt es, dass die Nerven (Geister) verzettelt und zerrissen oder gegen ihre Ordnung, ihre Natur und ihre Neigung getrennt werden.

Die *Bitterkeit* noch mehr die Rauigkeit, die den Gehörsnerven lebhafter reizt, wegen der Schnelligkeit ihrer Bewegungen und der stärker bewirkten Trennung, besonders wenn die Stärke die Geschwindigkeit begleitet, wie dies bei den schmetternden Tönen gewisser Hörner, Pfeifen und anderer Instrumente der Fall ist, die das Ohr durch ihre zu starken und zu spitzen(=hohen) Töne verletzen. Aber es ist nicht nötig hier über diese Unterschiede und Qualitäten ausführlicher zu sprechen, zumal wir in den andern Büchern noch einiges dazu sagen werden.

Schlusswort

Die Befragung von Theoretikertexten aus vier Jahrhunderten über das Wesen der Klangfarbe erlaubt es, einige herkömmliche Meinungen über die Genese der zugehörigen Konzepte und Theorien zu revidieren. Die Untersuchung der Interdependenzen zwischen mathematisch-naturwissenschaftlichen und musikalisch-philosophischen Ideologien und Paradigmata, ihre Dialektik, wirft neues Licht auf eine hoch interessante wissenschaftliche Theoriedynamik in einem fächerübergreifenden Umfeld.

Die im Zusammenhang mit der Klangfarbe zentralen Konzepte und Theorien, die als Errungenschaften des 19. Jahrhunderts gelten, sind alle schon früher bedacht worden. Bereits im 17. Jahrhundert werden die Existenz der Obertöne, Fragen der Spektraldynamik, die Knotenbildung bei Flageoletttönen, der Einfluss der spektralen Zusammensetzung auf die Klangqualität, das Resonanzverhalten der Basilarmembran sowie die Mehrfachresonanz in der menschlichen Stimme zur Sprache gebracht. In der Mathematik sind zeitgleich die Verfahren der Integration und der Differentiation, der Funktions- und der abstrakte Dimensionsbegriff im Kern vorhanden.

Diese Erkenntnisse sind gleichsam kaleidoskopartig in nicht integrierter Form auf verschiedene Köpfe verteilt; sowohl in der Mathematik als auch in der Musiktheorie.

Allerdings fehlen der mathematischen Physik auch wesentliche Momente, so dass die Aufstellung und Lösung der Bewegungsgleichung der idealen Saite erst in der Mitte des 18. Jahrhunderts – unter Voraussetzung von Newtons Gesetzen der Mechanik – gelingen kann. Erst zu diesem Zeitpunkt wird das für das Verständnis des Obertonphänomens zentrale Superpositionsprinzip erkannt und bei der Lösung partieller Differenzialgleichungen genutzt. Die Entdeckung der zugehörigen „musikalischen Tatsachen“ liegt zu diesem Zeitpunkt also schon mehr als hundert Jahre zurück.

Die Kontroverse zwischen Daniel Bernoulli und Leonhard Euler nimmt diejenige zwischen Georg Simon Ohm und August Seebeck in ihren wesentlichen Argumenten vorweg, mit dem kleinen Unterschied, dass in der letzteren die von Bernoulli behauptete Darstellbarkeit periodischer Klänge als Überlagerung von Sinustönen durch das Theorem von Fourier (-Dirichlet) nun sanktioniert ist. Dadurch wird die Sinusschwingung zum Ton schlechthin, obschon die ganzzahligen Frequenzvielfachen eines Sinustons nur ein Koordinatensystem unter vielen im Raum der periodischen Klänge darstellen.

Schon Beeckman und Mersenne beobachten inharmonische Teiltöne in Glockenklängen. Smith entwickelt für geringfügig verstimmte Konsonanzen 1749 eine diskrete Theorie der Schwebungszyklen, die von Thomson 1876/77 ein zweites Mal entwickelt und verfeinert wird. Die zugehörige mathematische Theorie der quasiperiodischen Funktionen, die einen verallgemeinerten Anwendungskontext der Fourieranalysis darstellt, wird aber erst in den 20-er Jahren des 20. Jahrhunderts nachgeliefert. Zur gleichen Zeit wird auch die Heisenberg'sche Unschärferelation aufgestellt und die Theorie der Integraltransformationen entwickelt. Die Unschärferelation vermittelt über eine Formel zwischen der diskreten und der kontinuierlichen Weltsicht, sie beschreibt die Doppelnatur des Lichts als Welle und als Teilchen und bereits in den 30-er Jahren wird ihre Bedeutung für die Akustik erörtert. Nicht nur deshalb erlangt das Wechselspiel von diskreter und kontinuierlicher Weltsicht, das am Ausgangspunkt dieser Arbeit stand und in den Positionen von Pythagoras und Euklid materialisiert ist, wieder zunehmend Bedeutung. Die Automatisierung von Rechenprozessen, wie sie der programmierbare Computer ermöglicht, hat ein Comeback diskreter numerischer Theorien und Verfahren zur Folge. Die schon von Gauss untersuchte trigonometrische Interpolation periodischer Funktionen führt im 20. Jahrhundert zur Theorie der diskreten Integraltransformationen, die es erlauben auf Basis einer endlicher Zahl von Daten zwischen

Zeit- und Frequenzbildern – mit effizienten Algorithmen – zu vermitteln. Die Vielzahl derartiger Verfahren zeigt auch ihre Vieldeutigkeit. Frequenz, Intensität und Phase werden dabei zu kontextabhängigen Begriffen.

In einer der Anwendungen der Multidimensionalen Skalierung wurde von Grey 1975 ein der diskreten Fouriertransformation abgeschautetes Verfahren für quasiperiodische Klänge entwickelt. Teiltonphasenmodulation und Frequenzverschiebung werden dabei zu mathematisch gleichwertigen Bestimmungen. Generell zeigt sich in der Psychoakustik eine wechselseitige Beeinflussung der Lautstärke, Tonhöhe und Klangfarbe, welche sich aus der Mechanik der Basilarmembran ableiten lässt.

Das Konzept der Periodiktöne, der höchsten gemeinsamen Untertöne ist bei Thomas Young 1800, Ohm 1839 und Seebeck 1843, später bei Koenig 1876 nachweisbar, und es wird 1938 von Schouten „entdeckt“. Die Periodiktöne zu leugnen, war vor der Zeit der Sinustöne ein Ding der Unmöglichkeit, denn Töne wurden in der Regel nur über die Periodizität der Luftbewegung definiert. Ein Periodikton ist unter diesem Gesichtspunkt nicht von einem Sinuston zu unterscheiden. Die verbesserte Versuchsanordnung erlaubt es Schouten, die Residualtöne in ihrer Wirkungsweise von den durch Nicht-Linearität verursachten Kombinationstönen und subjektiven Obertönen zu unterscheiden. Damit ist das Arsenal der für die Klangfarbe relevanten psychoakustischen Effekte komplett, und die Diskussion über Orts- und Zeittheorien verlagert sich zunehmend hirnwärts. Es gibt dazu eine reichhaltige hier nicht ausgewertete Spezialliteratur [vgl. Terhardt et al. 1982; Langner 1997].

Das Nachdenken über die Vielheit der Töne unter der Obhut des Klangs scheint in der Monadologie von Leibniz – dem Ko-Erfinder der Infinitesimalrechnung neben Newton – ein philosophisches Fundament zu erhalten, allerdings ist bei keiner der untersuchten Quelltexte von Rameau, Tartini, Mattheson ein offener Leibnizbezug nachweisbar. Matthesons Ton-Klang als atomares Punktobjekt, das heisst als Monade in einem mehrdimensionalen abstrakten Tonraum, ist in Retrospektive eine naheliegende Deutung, aber anachronistisch. *Einheit in der Vielheit* und *Vielheit in der Einheit* ist ein verbreiteter Topos des 18. Jahrhundert, als Forderung an das Kunstwerk als Ganzes. Seine Anwendung auf die Atome einer Komposition trägt im Sinne einer *harmonie universelle* die makroskopischen Gesetze in den Mikrokosmos hinein.

Eine räumliche Deutung des Klangs und seiner Attribute wird in dieser Deutlichkeit erst von Schönberg 1911 und von Handschin 1948 proklamiert. In der angelsächsischen Psychoakustik etabliert sich in der gleichen Zeit das geflügelte Wort der Klangfarbe als *multidimensional dimension*. Während schon Helmholtz die Verräumlichung der Farbeindrücke vollzieht, hat er seltsamerweise nie einen analogen Ansatz für die Klangfarbe verfolgt, vermutlich aus der Erkenntnis, dass das Ohr im Unterschied zum Auge nicht mehrere unterschiedliche Sinneszelltypen hat und demnach eine solche Deutung eine bloße Metapher ohne physiologisches Fundament darstellt.

Ein bisher kaum beachteter Syntheseversuch, vergleichbar mit demjenigen von Helmholtz, wird von de Mairan 1737 vor dem Hintergrund der Unsicherheit über die Natur des Lichts gegeben. Insbesondere wird dort das Resonanzmodell des Hörens mit einer gleichwertigen Metapher illustriert: Das in Mitschwingen versetzte Cembalo bei de Mairan wird von Rameau aufgegriffen und bei Helmholtz zur Harfe. Das Modell taugt zur Erklärung zahlreicher psychoakustischer Erscheinungen, obschon die Bewegung der Basilarmembran beim Hören, wie Békésy in den 30-er und 40-er Jahren des 20. Jahrhunderts nachweist, keineswegs der Vorstellung stehender Wellen in einem System stark gespannter und leicht mit einander verwobenen Harfensaiten folgt. Da Helmholtz den Text von de Mairan vermutlich bereits 1856, spätestens aber 1866, kennt, denn er zitiert ihn mit Seitenangabe bezüglich Ton/Farbe-

Korrespondenzen, kommt de Mairan als ungenannte Quelle des Helmholtz'schen Resonanzmodells durchaus in Frage. Eine weitere Helmholtz bekannte, ungenannte Quelle stellt der Text von Brandt 1855 dar, der in erstmaliger Deutlichkeit einen positiven Zusammenhang zwischen Amplitudenspektrum und Klangfarbe behauptet. Helmholtz selbst hat 1860, nach Veröffentlichung seiner Arbeit zur Klangfarbe der Vokale, die Publikation des Aufsatzes von Brandt veranlasst. Es ist denkbar, dass Helmholtz' Analyse der Vokallaute durch Brandt angeregt wurde.

Die deutsche *Klangfarbe* als musiktheoretischer und naturwissenschaftlicher Fachterminus scheint sich erst mit den Arbeiten von Helmholtz durchzusetzen, obschon er schon 1835 in Lexika als Übersetzung von *timbre* anzutreffen ist. Das französische *timbre* hingegen kommt in einer merkwürdigen Asynchronizität der Begriffsbildung fast ein Jahrhundert früher zu ihrer heutigen Bezeichnung, und zwar zu einer Zeit, als ihr mathematisches Pendant die *Funktion* ihre Objektwerdung schon abgeschlossen hat. Die im Umfeld der Enzyklopädisten festgestellte terminologische Lücke des Französischen führt zu einer metaphorischen Neubelegung des bereits zu diesem Zeitpunkt mehrdeutigen *timbre*. Rousseau verweist im *Dictionnaire de Musique* explizit auf den metaphorischen Ursprung des Begriffs, lässt aber die Referenzbedeutung ungenannt. Die Metapher ist möglicherweise bewusst mehrfach und deshalb umso treffender: die Schnarrsaite als Bild für die Tätigkeit der Klangformung und in der Singstimme für diejenige der Stimmbänder sowie für die spezifische Resonanz und Geräuschhaftigkeit des Tons. Letzteres auf Grund der mit dem Trommelschläger gemeinsamen etymologischen Wurzel.

Auch die deutsche Klangfarbe ist eine Metapher, allerdings nicht aus Mangel, sondern aus Überfluss synonyme Begriffe. Klangfarbe wäre angesichts der negativen Beurteilung der Castel'schen Farbenorgeln und -klaviere in der Mitte des 18. Jahrhunderts als Fachterminus undenkbar gewesen. Im Gefolge des Interesses an synästhetischen Erfahrungen und literarischen Schilderungen in der Romantik ergibt sich eine semantisch positive Besetzung des Wortzitters. Mit etymologischer Begründung kann die synästhetische Komponente durch die gemeinsame Wurzel von Farbe und Varietät neutralisiert werden, durchaus zum Schaden des schillernden Begriffs.

Die von Helmholtz nicht vorgenommene Metrisierung und Domestizierung der Klangfarbe wird durch die Anwendung der Multidimensionalen Skalierung gepaart mit psychoakustischen Erhebungen auf die Spitze getrieben. Rücken derartige Bestrebungen die Klangfarbe durch ihre Kerbung ins Licht des Gewöhnlichen und degradieren das Lebewesen Ton, den unmittelbaren Gesandten des Schreckens, zum toten Baukastenteil, oder eröffnen sich durch die Offenlegung und Festsetzung der Raumstruktur des Klanges neue Strukturierungsprinzipien und Erlebnishorizonte?

Literaturhinweise

Kap. 1: Grundlagen

[Aristoteles, Problemata]; [Bailhache 2001]; [Cannon et al. 1981]; [Engfer 1982]; [Fourier 1811]; [Fourier 1822]; [Galilei 1581]; [Galilei 1589]; [Galileo 1638]; [Helferich 1985]; [Krämer 1991]; [Leisinger 1994]; [Lenoble 1943]; [Mahoney www]; [Palisca 1989]; [Pfeiffer et al. 1994]; [Schüling 1969]; [Wymeersch 1999]

Kap. 2: 17. Jahrhundert: Kaleidoskop und *harmonie universelle*

[Aristoteles, De audibilis]; [Aristoteles, Katégoriai]; [Aristoteles, Problemata]; [Bailhache 1993]; [Bailhache 2001]; [Beeckman 1604-1634]; [Békésy et al. 1948]; [Bilsen 1969/70]; [Cannon et al. 1981]; [Cohen H. 1993];

[Descartes 16191]; [Descartes 16192]; [Descartes 1649]; [Descartes 1668]; [Dostrowsky et al. 1987]; [Engfer 1982]; [Green 1969]; [Gurlitt (ed) 1963]; [Kempelen 1791]; [Klein 1973]; [Köhler 1987]; [Lenihan 1951]; [Lenoble 1943]; [Ludwig 1935]; [Mahoney www]; [Mersenne 1636]; [Poisson 1668]; [Praetorius 1619/II] [Risset et al 1982]; [Verney 1683]; [Waard (ed) 1934]; [Wallis 1677]; [Wymeersch 1999]

Kap. 3: 18. Jahrhundert: Kakophonie in der Einheit

[Bernoulli 1753]; [Bernoulli 1764]; [Brossard ³1707(?)]; [Cannon et al. 1981]; [Cernuschi 1992]; [Cernuschi 2000]; [Chladni 1787]; [Cohen A. 1981]; [Dahlhaus 1989]; [Dähnert 1971]; [d'Alembert 1762]; [Diderot 1748]; [Diderot 1965]; [Diderot 1987]; [Dostrowsky et al. 1987]; [Encyclopédie 1765]; [Erleben 1777]; [Euler 1748]; [Euler 1749]; [Euler 1749b]; [Euler 1755]; [Euler 1764a]; [Euler 1764b]; [Euler 1765]; [Green 1969]; [Groddeck 1995]; [Herder 1768]; [Herder 1772]; [Hine 1996]; [Hire 1716a]; [Hire 1716b]; [Jaucourt 1765]; [Kafker, Kafker 1988]; [Kratzenstein 1782]; [Kehr 1912]; [Leisinger 1994]; [Mairan 1720]; [Mairan 1737]; [Malherbe 1990]; [Mattheson 1748]; [Menke 1999]; [Muzzulini 1991]; [Muzzulini 1994]; [Muzzulini 2001]; [Rameau 1722]; [Rameau 1726]; [Rameau 1737]; [Rousseau 1749]; [Rousseau 1762]; [Rousseau 1768]; [Rousseau 1979]; [Sauveur 1700]; [Sauveur 1701]; [Sauveur 1713]; [Simowitz 1983]; [Sirker 1980]; [Smith 1749]; [Sorge 1744]; [Sulzer 1771/1774]; [Tartini 1754]; [Ullmann 1996]; [Verney 1683]

Kap. 4: Das Wesen des Tons und das Aufscheinen der Klangfarbe

[Adelung 1796]; [Adelung 31811]; [Andersch 1829]; [Barkowsky 1996]; [Bartoli 1986]; [Berlioz 1841-1842]; [Berlioz 1876]; [Berlioz 2002]; [Berlioz, 1864]; [Boer 1979]; [Cadenbach 1998]; [Cagniard de la Tour 1819]; [Chladni 1802]; [Chladni 1817]; [Chladni 1827a]; [Chladni 1827b]; [Eckel 2001]; [Fourier 1811]; [Fourier 1822]; [Gage 1997]; [Groddeck 1995]; [Hällström 1832]; [Helmholtz 1852]; [Helmholtz 1856]; [Helmholtz 1857]; [Helmholtz 21885]; [Hesse 1972]; [Hesse 1974]; [Jakob 1995]; [Jean Paul 1804]; [Jean Paul 1813]; [Jewansky 1999]; [Jost 2001]; [Käuser 2001]; [Kempelen 1791]; [Koch 1802]; [Krüger 1994 (ed)]; [Lichtenhahn 1983 a]; [Lichtenhahn 1983 b]; [Macdonald 2002]; [Maehder 1978]; [Menke 1999]; [Meßwarb 1997]; [Muzzulini 2000]; [Muzzulini 2001]; [Ohm 1839]; [Ohm 1843]; [Ohm 1844]; [Pistone 1986]; [Ritsma 1962]; [Sandell www]; [Schläpfer 1993]; [Schneider H. Et al (ed) 2001]; [Seebeck 1843]; [Seebeck 1844a]; [Seebeck 1844b]; [Seebeck 1941]; [Spaten 1691]; [Turner 1977]; [Ullmann 1982]; [Ullmann 1996]; [Weber 1829a]; [Weber 1829b]; [Weber G. 1817]; [Weber G. 1822]; [Weber G. 1835]; [Willis 1832]; [Young 1800]

Kap. 5: Helmholtz' Klangfarbentheorie

[Békésy et al. 1948]; [Brandt 1855]; [Cooper et al. 1952]; [Dickreiter 1994]; [Handschin 1948]; [Heidelberger 1994]; [Helmholtz 1859]; [Helmholtz 1863]; [Helmholtz 51896]; [Helmholtz, du Bois 1846-1894]; [Hiebert, Hiebert 1994]; [Kirsten (ed) 1986]; [Krüger 1994 (ed)]; [Mayer 1876]; [McDonald 2000]; [Meyering 1989]; [Mol 1970]; [Pierce 1989]; [Ru et al. 1997]; [Schiemann 1994]; [Schulisch 1983]; [Schulte 1967]; [Steinberg 1929]; [Steinberg 1937]; [Stumpf 1918]; [Ullmann 1988]; [Ullmann 1996]; [Universalgenie 1994]; [Verney 1683]; [Warren, Warren 1968]

Kap. 6: Die Phasenfrage

[Arlinger et al. 1979]; [Barkowsky 1996]; [Beasley 1930]; [Békésy 1934]; [Békésy 1947]; [Boer 1979]; [Buunen et al. 1974]; [Chapin et al. 1934]; [Chocholle et al. 1947]; [Chocholle et al. 1957]; [Fleischer 1976]; [Goldstein 1973]; [Hermann 1894]; [Hermann 1896]; [Hesse 1972]; [Klump et al. 1950]; [Koenig 1876]; [Koenig 1881 a]; [Koenig 1881 b]; [Koenig 1896]; [Kuile 1902]; [Langner 1997]; [Lewis et al. 1933]; [Licklider 1954a]; [Licklider 1954b]; [Licklider 1956]; [Licklider et al. 1950]; [Meddis et al. 1991]; [Muzzulini 1985]; [Newman et al. 1937]; [Nitsche 1970]; [Nitsche 1972]; [Nitsche 1978]; [Onchi 1949]; [Pierce 1989]; [Pistone 1986]; [Plomp 1976]; [Pressnitzer 2000]; [Pressnitzer et al. 1999]; [Ritsma 1962]; [Robbins 1952]; [Schouten 1938]; [Schouten 1940]; [Schouten 1940b]; [Schouten et al. 1962]; [Schroeder 1959]; [Schürgel 1970]; [Seebeck 1843]; [Seebeck 1844a]; [Seebeck 1844b]; [Seebeck 1941]; [Small 1955]; [Smoorenburg 1974]; [Thomson 1877/78]; [Tolmie 1934]; [Trimmer et al. 1937]; [Turner 1977]; [Ullmann 1982]; [Universalgenie 1994]; [Walliser 1969]; [Walliser 1969b]; [Warren et al. 1951]; [Wogram 1988]

Kap. 7: Klangfarbenräume

[Abromont 1986]; [Bachem 1948]; [Benedini 1978]; [Berger 1964]; [Bilsen 1969/70]; [Black 1939]; [Bongni 2000]; [Boulez 1987]; [Bruijn 1978]; [Capellen 1903]; [Cheveigné et al. 1995]; [Cheveigné et al. 1997];

[Chowning 1973]; [Cooper et al. 1952]; [Cotton 1935]; [Craig et al. 1960]; [Craig et al. 1962]; [Cross 2002]; [Dahlhaus 1970]; [Donnadieu et al. 1994]; [Ebeling 1999]; [Faure et al. 1996]; [Grey 1975]; [Grey 1977]; [Grey et al. 1978]; [Handschin 1948]; [Hart et al. 1934]; [Hauer (1918)]; [Helmholtz 1856]; [Helmholtz 1898]; [Helmholtz 21885]; [Hesse 1972]; [Hesse 1974]; [Jackendoff et al. 1983]; [Kendall et al. 1991]; [Kock 1936]; [Lehrdahl 1987]; [Leman 1997]; [Marin et al. 1991]; [Mazzola 1990]; [Mc Adams et al. 1992]; [Mc Adams et al. 1995]; [Mc Adams et al. 2000]; [Meier et al. 2000]; [Mertens 1975]; [Mol 1970]; [Muzzulini 2000]; [Pierce 1989]; [Pistone 1986]; [Plomp 1976]; [Plomp et al. 1969]; [Poli et al. 1997]; [Pratt 1976]; [Pressnitzer 2000]; [Rahlfis 1966]; [Reuter 1995]; [Reuter 1996]; [Risset 1986]; [Risset et al. 1982]; [Ru et al. 1997]; [Schlöpfer 1993]; [Schmusch 1994]; [Schönberg 1911]; [Schönberg 1966]; [Schönberg 1969]; [Schönberg 1992]; [Schouten 1968]; [Schulte 1967]; [Schumann 1925]; [Schumann 1929]; [Schumann 1973]; [Schürkel 1970]; [Sivian et al. 1930]; [Slawson 1985]; [Small 1955]; [Stout 1938]; [Straub 1929]; [Stumpf 1918]; [Thies 1982]; [Tolmie 1934]; [Trendelenburg 1935]; [Universalgenie 1994]; [Valenzuela 1998]; [Warner 1982]; [Wever et al. 1938]

Kap. 8: Spektralanalyse im 19. und 20. Jahrhundert

[Barkowsky 1996]; [Beth1984]; [Brigham 1982]; [Cahiers de l'IRCAM 1993 2]; [Fourier 1811]; [Fourier 1822]; [Gnosh 1935]; [Goldstine 1977]; [Grey 1975]; [Hairer et al. 1995]; [Kock 1935]; [Mayer-Kuckuk 1980]; [Mazzola 1990]; [Meyer-Eppler 1969]; [Myschkis 1981]; [Pinkus et al. 1997]; [Rao et al. 1998]; [Reuter 1995]; [Smith 1749]; [Steinberg 1937]; [Stewart 1931]; [Valenzuela 1998]; [Walker 1999]; [Wogram 1988]; [Wupper 1989]

A (Allgemeine Literatur)

[Arlinger et al. 1979]; [Bailhache 2001]; [Balzano 1986]; [Barrière (ed) 1991]; [Berg et al. 1995]; [Bongni 2000]; [Boulez 1987]; [Bourgois (ed) 1991]; [Burghauser et al. 1971]; [Cadenbach 1998]; [Cadoz 1990]; [Chion 1986]; [Dähnert 1971]; [Davis et al. 1951]; [de la Motte-Haber (ed) 1999]; [Degering 1905]; [Dickreiter 1994]; [Ebeling 1999]; [Eska 1997]; [Fischer-Dieskau 1998]; [Gage 1997]; [Gerlach 1973]; [Gousset 1986]; [Graf 1969a]; [Graf 1969b]; [Hart et al. 1934]; [Heinz 1967]; [Jewansky 1999]; [Lagrange 1867]; [Lagrange 1867b]; [Le Timbre 1991]; [Lechleitner 1989]; [Leman 1997]; [Lindsay 1966]; [Lorenz 1973]; [Mc Adams et al. 1991]; [MGG ²1994]; [Piencikowsky 1986]; [Qualitätsaspekte 1988]; [Rayleigh 1887]; [Riemann 21921]; [Roederer 1977]; [Rösing 1972]; [Russell 1929]; [Sandell www]; [Schneider 1997]; [Schönberg 1956]; [Schönberg 1992]; [Schumann 1923]; [Seashore 1938]; [Sivian et al. 1930]; [Steinberg 1929]; [Stout 1938]; [Suppan (ed) 1985]; [Terhardt 1988]; [Trendelenburg 1950]; [Van Khê 1986]; [Voigt 1985]; [Winckel 1952]; [Zielinski 1966]; [Zwicker et al. 1967];

L (Lexika)

[Adelung 1796]; [Adelung 31811]; [Andersch 1829]; [Brossard 31707(?)]; [Encyclopédie 1765]; [MGG ²1994]; [Spaten 1691]

M (Mathematik)

[Beth1984]; [Brigham 1982]; [Goldstine 1977]; [Hairer et al. 1995]; [Mayer-Kuckuk 1980]; [Myschkis 1981]; [Pfeiffer et al. 1994]; [Pinkus et al. 1997]; [Rao et al. 1998]; [Walker 1999]

P (Psychoakustik)

[Allen 1979]; [Aures 1984]; [Black 1939]; [Bourgois (ed) 1991]; [Cooper et al. 1952]; [Eggermont 1979]; [Fletcher 1929]; [Fletcher 1934]; [Fletcher 1938]; [Fletcher et al. 1933]; [Fletcher et al. 1937]; [Gerlach 1973]; [Gnosh 1935]; [Hart et al. 1934]; [Hoke (ed) et al. (ed) 1979]; [Houtsma 1997]; [Jenkins 1961]; [Jost E. 1969]; [Kemp 1979]; [Kim et al. 1979]; [Klump et al. 1950]; [Kock 1935]; [Krauss 1991]; [Langner 1997]; [Lewis et al. 1935]; [Licklider 1951]; [Licklider et al. 1950]; [Lüscher et al. 1949]; [Mayer 1876]; [Onchi 1949]; [Pielemeier et al. 1996]; [Pierce 1989]; [Reuter 1996]; [Robbins 1952]; [Roederer 1977]; [Schouten 1968]; [Snow 1936]; [Steinberg 1929]; [Steinberg 1937]; [Stevens 1935]; [Stevens et al. 1936]; [Stevens et al. 1937]; [Terhardt 1974]; [Terhardt 1988]; [Terhardt et al. 1982]; [Tolmie 1934]; [Trendelenburg 1935]; [Warren et al. 1951]; [Wever et al. 1938]; [Wever et al. 1948]; [Zwicker (ed) et al. 1974]

Literaturverzeichnis

Die Bibliographie enthält die verwendete und weiterführende Literatur. Die Jahreszahlen in der linken Spalte geben das Publikationsdatum an. Falls das Entstehungsdatum davon wesentlich abweicht wird dieses angegeben (z.B. [Brandt 1855], Descartes [1619]). Die Codes in der vierten Zeile bedeuten: 1, ... , 8: Verweise auf Kapitelnummern; A: allgemeine Literatur, L: Lexika, M: Mathematik, P: Psychoakustik.

[A]

- [Abromont 1986] Claude Abromont, A propos de Farben: invention et figuration dans la pensée de Schoenberg, Analyse musicale, 2e trimestre 1986, 46–50 {7}
- [Adelung 1796] Johann Christoph Adelung, Grammatisch-kritisches Wörterbuch der Hochdeutschen Mundart, 2. Auflage 1796 {4, L}
- [Adelung ³1811] Johann Christoph Adelung, Grammatisch-kritisches Wörterbuch der Hochdeutschen Mundart, http://mdz.bib-bvb.de/digbib/lexika/adelung/text/@Generic__CollectionView:cs=default:ts=default:lang=de {4, L}
- [Allen 1979] J. B. Allen, Cochlear models - 1978, Models of the auditory system and related signal processing techniques, Scand. Audiol. Suppl. 9, Münster 1979, 1–16 {P}
- [Andersch 1829] Johann Daniel Andersch, Musikalisches Wörterbuch. Für Freunde und Schüler der Tonkunde, Berlin 1829 {4, L}
- [Aristoteles, De audibilis] Aristoteles, Über das Hörbare, Ulrich Klein, Übersetzung, Einleitung und Kommentar, Stuttgart, 1972 {2}
- [Aristoteles, Katégoriai] Aristoteles, Die Kategorien, Digitale Bibliothek Band 2, Philosophie von Platon bis Nietzsche, Directmedia, Berlin 1998, 2-24 (=2772-2820) {2}
- [Aristoteles, Problemata] Aristoteles, Problemata physica, Übersetzt von Hellmut Flashar, Akademie-Verlag, Berlin 1962 {1, 2}
- [Arlinger et al. 1979] S. D. Arlinger, J. B. Jerlvall, Results of psychoacoustic and cortical evoked potential experiments using frequency and amplitude modulated stimuli, Models of the auditory system and related signal processing techniques, Scand. Audiol. Suppl. 9, Münster 1979, 229–239 {6, A}
- [Aures 1984] Wilhelm Aures, Berechnungsverfahren für den Wohlklang beliebiger Schallsignale, Ein Beitrag zur gehörbezogenen Schallanalyse. Diss., TU München 1984 {P}

[B]

- [Bachem 1948] A. Bachem, Chroma fixation at the ends of the musical frequency scale, JASA, 20, 1948, 704–705 {7}
- [Bailhache 1993] Patrice Bailhache Cordes vibrantes et consonances chez Beeckman, Mersenne et Galilée, Sciences et techniques en perspective, no 23, Université de Nantes, "Musique et mathématiques", 1993, p. 73-91. (= <http://bailhache.humana.univ-nantes.fr/thmusique/cordesvibr.html>) {2}
- [Bailhache 2001] Patrice Bailhache, Une histoire de l'acoustique musicale, CNRS Éditions, Paris 2001 {1, 2, A}
- [Balzano 1986] Gerald J. Balzano, What are musical pitch and timbre?, Music Perception, Spring 1986, Vol. 3, No. 3, 297–314 {A}
- [Barkowsky 1996] Johannes Barkowsky: Das Fourier-Theorem in musikalischer Akustik und Tonpsychologie. Schriften zur Musikpsychologie und Musikästhetik, Bd. 8. hg. Helga de la Motte-Haber, Peter Lang, Frankfurt am Main, 1996 {4, 6, 8}
- [Barrière (ed) 1991] Jean-Baptiste Barrière (ed), Le timbre, métaphore pour la composition, I.R.C.A.M., 1991 {A}

- [Bartoli 1986] Jean-Pierre Bartoli, *Ecriture du timbre et espace sonore dans l' œuvre de Berlioz*, *Analyse musicale*, 2e trimestre 1986, 31–36 {4}
- [Beasley 1930] W. Beasley, The monaural phase effect with pure binary harmonics in frequency ratio 2 : 3, *JASA* 1, 1930, 385–402 {6}
- [Beeckman 1604-1634] Loci Communes, *Journal tenu par Isaac Beeckman de 1604 à 1634*, Ed. C. de Waard, 4 Bände, Martinus Nijhoff, La Haye 1939 {2}
- [Békésy 1934] Georg von Békésy, Über die nichtlinearen Verzerrungen des Ohres, *Ann. Physik* 20, 1934, 809–827 {6}
- [Békésy 1947] Georg von Békésy, The variation of phase along the basilar membrane with sinusoidal vibrations, *JASA* 19, 1947, 452–460 {6}
- [Békésy et al. 1948] Georg von Békésy, Walter A. Rosenblith, The early history of hearing – Observations and theories, *JASA* 20, 1948, 727–748 {2, 5}
- [Benedini 1978] Kurt Benedini: Psychoakustische Messung der Klangfarben-Ähnlichkeit harmonischer Klänge und Beschreibung der Zusammenhänge zwischen Amplitudenspektrum und Klangfarbe durch ein Modell. Diss., TU München 1978, {7}
- [Berg et al. 1995] Richard E. Berg, David G. Stock: *The Physics of Sound*, 2. Aufl., Prentice Hall, New Jersey, 1995 {A}
- [Berger 1964] Kenneth W. Berger, Some factors in the recognition of timbre, *JASA* 36, 1964, 1888–1891 {7}
- [Berlioz 1841-1842] Hector Berlioz, *De l' instrumentation*, 'Edition présentée par Joël-Marie Fauquet, Le Castor Astral, 1994 {4}
- [Berlioz 1864] *Instrumentationslehre von Hector Berlioz. Ein vollständiges Lehrbuch [...]* Autorisierte deutsche Ausgabe von Alfred Dörffel, Leipzig 1864 {4}
- [Berlioz 1876] Hector Berlioz, *Traité d' instrumentation et d' orchestration*, Nouvelle Édition suivi de „L' art du chef d' orchestre“, Nouvelle Édition, Henry Lemoine (1876), Paris – Bruxelles, Gregg International Publishers Limited, Westmead 1970 {4}
- [Berlioz 2002] Hugh Macdonald, *Berlioz's Orchestration Treatise, A Translation and Commentary*, Cambridge University Press, Cambridge 2002 {4}
- [Bernoulli 1753] Daniel Bernoulli, *Réflexions et éclaircissements sur les nouvelles vibrations de cordes*, *Histoire de l' Académie des Sciences et Belles-Lettres* 9 (1753), 147–152 {3}
- [Bernoulli 1753] Daniel Bernoulli, *Recherches physiques mécaniques et analytiques sur le son et sur le tons des tuyaux d' orgues différemment construits*, Paris 1764, Reprint Arnaldo Forni Editore, Bologna 1983 {3}
- [Beth 1984] Thomas Beth, *Verfahren der schnellen Fourier-Transformation*, Teubner: Stuttgart 1984 {8, M}
- [Bilsen 1969/70] F. A. Bilsen, Repetition Pitch and Its Implication for Hearing Theory, *Acustica*, 22, 1969/70, 63–73 {2, 7}
- [Black 1939] The effect of the consonant on the vowel, *JASA* 10, 1939, 203–205 {7, P}
- [Boer 1979] E. de Boer, Travelling waves and cochlear resonance, *Models of the auditory system and related signal processing techniques*, *Scand. Audiol. Suppl.* 9, Münster 1979, 17–33 {4, 6}
- [Bongni 2000] Marcel Bongni, *Wassily Kandinskys Synthese der Künste, Eine Analyse von „Bilder einer Ausstellung“* Diss. Univ. Zürich, ADAG Copy AG, Zürich 2000 {7, A}
- [Boulez 1987] Pierre Boulez, *Timbre and composition – timbre and language*, *Contemporary Music review*, 1987, Vol. 2, 161–171 {7}
- [Bourgeois (ed) 1991] *Le Timbre, Métaphore pour la Composition*, IRCAM, hg. Christian Bourgeois, 1991 {A}
- [Brandt 1855] Eduard Brandt, *Ueber die Verschiedenheit des Klanges (Klangfarbe)*, {5}

- Annalen der Physik und Chemie 112, 1861, 324–336
- [Brigham 1982] E. Oran Brigham, FFT: Schnelle Fourier-Transformation, Übersetzt von Seyed Ali Azizi, Oldenbourg Verlag, München, Wien 1982 {8, M}
- [Brossard ³1707(?)] DICTIONNAIRE DE MUSIQUE, contenant une explication Des Termes Grecs, Latins, Italiens & François les plus usitez dans la Musique. [...] Troisième Edition. Estienne Roger, Amsterdam {1, 3}
- [Bruijn 1978] A. de Bruijn, Timbre Classification of Complex Tones, The Relation between Subjective and Physical parameters, *Acustica*, 40, 1978, 109–114 {7}
- [Burghauser et al. 1971] Jarmil Burghauser, Antonin Špelda, *Akustische Grundlagen des Orchestrierens*, Gustav Bosse Verlag, Regensburg 1971 {A}
- [Buunen et al. 1974] T.J.F. Buunen, F.A. Bilsen: Subjective phase effects and combination tones. In: *Facts and models in hearing* (1974), 344–352 {6}
- [C]
- [Cadenbach 1998] Rainer Cadenbach, *Tonmalerei als Farbenkunst*, Johann Leonhard Hoffmanns Versuch einer wechselseitigen Erläuterung von malerischer Harmonie und Tonkunst. In: *Töne – Farben – Formen: über Musik und die bildenden Künste*, hg. Elisabeth Schmierer et al, Laaber, Laaber ²1998 {4, A}
- [Cadoz 1990] Claude Cadoz, *Musique contemporaine: réalité du timbre? Virtualité de l'instrument! Analyse musicale*, 1er trimestre 1990, 68–72 {A}
- [Cagniard de la Tour 1819] Charles Cagniard de la Tour, Sur la sirène, nouvelle machine d'acoustique destinée à mesurer les vibrations de l'air qui constituent le son, *Annales de chimie et de physique* 12, 1819, 167–171 {4}
- [Cahiers de l'IRCAM 1993 2] les cahiers de l'IRCAM 1993, 2, la synthèse sonore, IRCAM 1993 {8}
- [Cannon et al. 1981] John T Cannon, Sigalia Dostrovsky: The evolution of dynamics: vibration theory from 1687 to 1742 (Studies in the history of mathematics and physical sciences 6), Springer, New York 1981 {1, 2, 3}
- [Capellen 1903] Georg Capellen, *Die "musikalische" Akustik*, Verlag C. F. Kahnt Nachfolger, Leipzig 1903 {7}
- [Cernuschi 1992] Alain Cernuschi, Les avatars de quelques articles de musique de Rousseau entre *Encyclopédie* et *Dictionnaires thématiques* ou de la polyphonie encyclopédique. *Recherches sur Diderot et sur l'Encyclopédie*, 12, avril 1992, 113–134 {3}
- [Cernuschi 2000] Entre les articles musicaux de l'Encyclopédie et le Dictionnaire de Musique: Une "Table des Mots" énigmatique, *Bulletin de l'Association Jean Jacques Rousseau* n° 55, 2000, Neuchâtel 2001, 27–60 {3}
- [Chapin et al. 1934] E. K. Chapin, F. A. Firestone, The influence of phase on tone quality and loudness; The interference of subjective harmonics, *JASA* 5, 1934, 173–180 {6}
- [Cheveigné et al. 1995] Alain de Cheveigné, Stephen McAdams, Jean Laroche, Muriel Rosenberg: Identification of Concurrent Harmonic and Inharmonic Vowels: A Test of the Theory of Harmonic Cancellation and Enhancement, *Journal of the Acoustical Society of America*, 97, 3736–3748, (1995) {7}
- [Cheveigné et al. 1997] Alain De Cheveigné, Stephen McAdams, Cécile M.H Marin: Concurrent Vowel Identification: II. Effects of Phase, Harmonicity, and Task, *JASA: Journal of the Acoustical Society of America*, Mai 1997 {7}
- [Chion 1986] Michel Chion, La dissolution de la notion de timbre, *Analyse musicale*, 2e trimestre 1986, 7–8 {A}
- [Chladni 1787] Ernst Florens Friedrich Chladni, *Entdeckungen über die Theorie des Klanges*, Weidmanns Erben und Reich, Leipzig 1787
- [Chladni 1802] Ernst Florens Friedrich Chladni, *Die Akustik*, Leipzig 1802 {4}
- [Chladni 1817] Ernst Florens Friedrich Chladni, *Neue Beiträge zur Akustik*, Breitkopf und {4}

- Härtel, Leipzig 1817
- [Chladni 1827a] Ernst Florens Friedrich Chladni, Über die verschiedene Beschaffenheit des Klanges eines Instrumentes, nachdem es von verschiedenen Spielern behandelt wird; auch über das Zerschlagen der Claviersaiten (mit einem Vorwort von Gfr. Weber), *Caecilia* 6, 1827, 183–192
- [Chladni 1827b] Ernst Florens Friedrich Chladni, Kurze Uebersicht der Schall- und Klanglehre, nebst einem Anhang, die Entwicklung und Anordnung der Tonverhältnisse betreffend, Mainz 1827
- [Chocholle et al. 1947] R. Chocholle, J. Segal, Les sons de combinaison, *Comptes rendus des séances de la Société de Biologie*, 141, 1947, 9–11 {6}
- [Chocholle et al. 1957] R. Chocholle, J. P. Legoux, About the Sensations of Beats between Two Tones Whose Frequencies are Nearly in a Simple ration, *JASA* 29, 1957, 750 {6}
- [Chowning 1973] John M. Chowning, The synthesis of complex audio spectra by means of frequency modulation, *Journal of the Audio Engineering Society*, 21, 1973, 526–534 {7}
- [Cohen A. 1981] Albert Cohen, Music in the French Royal Academy of Sciences, A Study in the evolution of musical thought. Princeton University Press, 1981 (insbes. 17–40) {3}
- [Cohen H. 1993] H. Floris Cohen, La musique comme science physique et mathématique au XVII^e siècle, in: *Musique et Humanisme à la Renaissance*, Cahier V. L. Saulnier 10, Presses de l'Ecole Normale Supérieure, Paris 1993 {2}
- [Cotton 1935] J. C. Cotton, Beats and combination tones at intervals between the unison and the octave, *JASA* 7, 1935, 44–50 {7}
- [Cooper et al. 1952] Some experiments on the perception of synthetic speech sounds, *JASA* 24, 1952, 597–606 {5, 7, P}
- [Craig et al. 1960] James H. Craig, Lloyd A. Jeffress, Why Helmholtz Couldn't Hear Monaural Phase Effects, *JASA* 32, 1960, 894–895 {7}
- [Craig et al. 1962] James H. Craig, Lloyd A. Jeffress, Effect of Phase on The Quality of a Two-Component Tone, *JASA* 34, 1962, 1752–1760 {7}
- [Cross 2002] Jonathan Cross, Fünf Orchesterstücke op. 16. In: Arnold Schönberg, Interpretationen seiner Werke Band 1, hg. Gerold W. Gruber, Laaber: Laaber 2002 {7}
- [D]**
- [Dahlhaus 1970] Carl Dahlhaus, Schöbergs Orchestertstück op. 16, 3 und der Begriff der Klangfarbenmelodie (1970), Schönberg und andere, Gesammelte Aufsätze zur Neuen Musik, Schott, Mainz 1978 {7}
- [Dahlhaus 1989] Dahlhaus, Carl: Die Musiktheorie im 18. und 19. Jahrhundert, Zweiter Teil Deutschland (= Geschichte der Musiktheorie Band 11), Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt 1989 {3}
- [Dähnert 1971] Ulrich Dähnert, Die Orgeln Gottfried Silbermanns in Mitteldeutschland, 1953, Faksimile Frits Knuf, Amsterdam 1971 {3, A}
- [d'Alembert 1762] Jean Lerond d'Alembert, *Elémens de musique, théorique et pratique*, suivant le principes de Rameau, 2. ed, Lyon 1762 {3}
- [Davis et al. 1951] H. Davis, S. R. Silverman, D. R. McAuliffe, Some Observations on Pitch and Frequency, *JASA* 23, 1951, 40–42 {A}
- [de la Motte-Haber (ed) 1999] Klangkunst, Tönende Objekte und klingende Räume, Handbuch der Musik im 20. Jahrhundert, Bd. 12, Laaber: Laaber 1999 {A}
- [Degering 1905] Hermann Degering, Die Orgel, ihre Erfindung und ihre Geschichte bis zur Karolingerzeit, 1905, Photomech. Nachdr. Frits Knuf, Buren 1989 {A}
- [Descartes A.T.] Charles Adam, Paul Tannery (ed), *Oeuvres de Descartes*, L. Cerf, Paris, 1897- {2}

- s1913. Vol. I (1897): Correspondance, 1622-1638; Vol. X (1908): Regulae ad directionem ingenii / Supplément à la correspondance
- [Descartes 1619¹] Renati Des-cartes, Musicæ Compendium, Trajecti Ad Rhenum, Typis Gisberti à Zÿll, & Theodori ab Ackersdÿck, 1650, Facsimile P.-Heitz, Strassbourg 1965 {2}
- [Descartes 1619²] Renatus Descartes, Leitfaden der Musik, Herausgegeben, ins Deutsche übertragen und mit Anmerkungen versehen von Johannes Brockt, lateinischer Text nach Amsterdam 1656, Wissenschaftliche Buchgesellschaft Darmstadt, 1978 {2}
- [Descartes 1649] Die Leidenschaften der Seele, Herausgegeben und übersetzt von Klaus Hammacher, Felix Meiner Verlag, Hamburg 1984 (Les passions de l'âme, Paris 1649) {2}
- [Descartes 1668] René Descartes, Abrégé de musique ; suivi des éclaircissements physiques sur la musique de Descartes du R.P. Nicolas Poisson, Meridiens Klincksieck, Paris 1990 {2}
- [Dickreiter 1994] Michael Dickreiter, Musikinstrumente: moderne Instrumente, historische Instrumente, Klangakustik, Bärenreiter, Kassel, 4 Aufl. 1994 {5, A}
- [Diderot 1748] Mémoires sur différents sujets de mathématiques, Paris Durand 1748, Première mémoire: Principes généraux d'acoustique in: Denis Diderot Oeuvres complètes, Edition chronologique, Le Club Français du Livre, 1969 {3}
- [Diderot 1965] Denis Diderot, Lettre sur les sourds et muets, Edition commentée et présentée par Paul Hugo Meyer, Diderot Studies VII, Edited by Otis Fellows, Librairie Droz, Genève 1965 {3}
- [Diderot 1987] Denis Diderot, Ecrits sur la musique, textes choisis et présentés par Béatrice Durand-Sendrail, Editions Jean-Claude Lattès, 1987 {3}
- [Donnadieu et al. 1994] Sophie Donnadieu, Stephen McAdams, Suzanne Winsberg: Context Effects in Timbre Space, ICMPC 94, Liège, 1994 {7}
- [Dostrowsky et al. 1987] Sigalia Dostrowsky, John T. Cannon, Entstehung der musikalischen Akustik (1600–1750). In Frieder Zaminer (Hg.); Geschichte der Musiktheorie. Bd. 6: Hören Messen und Rechnen in der frühen Neuzeit, 1987, 7–79 {2,3}
- [E]**
- [Ebeling 1999] Martin Ebeling, Tonhöhe physikalisch – musikalisch – psychologisch – mathematisch, Systematische Musikwissenschaft Bd. 2, hg. Jobst P. Fricke, Peter Lang, Frankfurt a. M. 1999 {7, A}
- [Eckel 2001] Winfried Eckel, Bildersturm und Bilderflut in der Literatur der Romantik, Beobachtungen zu Wilhelm Heinrich Wackenroder und Ludwig Tieck. In: Schneider H. Et al (ed) 2001, 211-228 {4}
- [Eggermont 1979] J. J. Eggermont, Compound action potentials: Tuning curves and delay times, Models of the auditory system and related signal processing techniques, Scand. Audiol. Suppl. 9, Münster 1979, 130–139 {P}
- [Encyclopédie 1765] Encyclopedie ou Dictionnaire Raisonné des Sciences, des Art et des métiers, Bd. 15. Sen-Tch; Bd. 16, Te-Venerie, Neufchastel 1765 {3, L}
- [Engfer 1982] Hans-Jürgen Engfer, Philosophie der Analysis, Studien zur Entwicklung philosophischer Analysekonzeptionen unter dem Einfluß mathematischer Methodenmodelle im 17. und frühen 18. Jahrhundert, frommann-holzboog, Stuttgart 1982 {1, 2}
- [Erxleben 1777] Johann Christian Polykarp Erxleben, Anfangsgründe der Naturlehre, Zweyte sehr verbesserte und vermehrte Auflage, Frankfurt und Leipzig, 1777, UB Jh IV 15 {3}
- [Eska 1997] Georg Eska, Schall & Klang, Wie und was wir hören, Birkhäuser, Basel 1997 {A}

- [Euler 1748] Leonhard Euler, Sur la vibration des cordes, 1748, Opera Omnia, Serie 2, Vol. 10, 1947, 63–77 {3}
- [Euler 1749] Leonhard Euler, De vibratione chordarum exercitatio, 1749, Opera Omnia, Serie 2, Vol. 10, 1947, 50–62 {3}
- [Euler 1749b] De vibratione chordarum exercitatio, 1749, Opera Omnia, Serie 2, Vol. 10, 1947, 50–62 {3}
- [Euler 1755] Leonhard Euler, Remarques sur les Mémoires précédens de M. Bernoulli, 1755, Opera Omnia, Serie 2, Vol. 10, 1947, 233–254 {3}
- [Euler 1764a] Leonhard Euler, De motu vibratorio tympanorum, 1764, Opera Omnia, Serie 2, Vol. 10, 1947, 344–359 {3}
- [Euler 1764b] Leonhard Euler, Tentamen de sono campanarum, 1764, Opera Omnia, Serie 2, Vol. 10, 1947, 360–376 {3}
- [Euler 1765] Leonhard Euler, Eclaircissemens plus détaillés sur la génération et la propagation du son et sur la formation de l'écho, (1765) 1767, Opera Omnia, Serie 3, Vol. 1, 1946, 540–567 {3}

[F]

- [Faure et al. 1996] Anne Faure, Stephen McAdams, Valery Nosulenko: Verbal correlates of perceptual dimensions of timbre, 4th International Conference on Music Perception and Cognition, Montréal, Canada, Août 1996, Faculty of Music, McGill University, Montreal Canada 1996 {7}
- [Fischer-Dieskau 1998] Dietrich Fischer-Dieskau, Pigment und Schallwelle. In: Töne – Farben – Formen: über Musik und die bildenden Künste, hg. Elisabeth Schmierer et al, Laaber, Laaber 1998 {A}
- [Fleischer 1976] Helmut Fleischer: Untersuchung zur Hörbarkeit von Phasenänderungen. TU München 1976, {6}
- [Fletcher 1929] Harvey Fletcher, A Space-Time Pattern Theory of Hearing, JASA 1, 1929, 311–343 {P}
- [Fletcher 1934] Harvey Fletcher, Loudness, pitch and timbre of musical tones and their relation to the intensity, the frequency and the overtone structure, JASA 6, 1934, 59–69 {P}
- [Fletcher 1938] Harvey Fletcher, Loudness, masking and their relation to the hearing process and the problem of noise measurement, JASA 9, 1938, 275–293 {P}
- [Fletcher et al. 1937] Relation between loudness and masking, JASA 9, 1937 {P}
- [Fletcher et al. 1933] Harvey Fletcher, W. A. Munson, Loudness its definition, measurement and calculation, JASA 5, 1933, 82–108 {P}
- [Fourier 1811] J. B. Fourier, Mém. acad. France 4, 185, Paris 1924 (bereits am 29.9.1811 vorgelegt) {1, 4, 8}
- [Fourier 1822] J. B. Fourier, Théorie analytique de la chaleur, Paris 1822 (258)s {1, 4, 8}

[G]

- [Gage 1997] John Gage, Kulturgeschichte der Farbe, Von der Antike bis zur Gegenwart, Ravensburger Buchverlag, Ravensburg 1997]
- [Galilei 1581] Vincenzo Galilei, Dialogo della musica antica et moderna, Florenz 1581, Reale Accademia d'Italia, Roma 1934 {1}
- [Galilei 1589] Vincenzo Galilei, Discorso intorno all'opere di messer Gioseffo Zarlino da Chioggia, et altri importanti particolari attenenti alla musica, Florenz 1589, Bollettino Bibliografico Musicale, Milano 1933 {1}
- [Galileo 1638] Galileo Galilei, *Discorsi e dimostationi matematiche*, Unterredungen und mathematische Demonstrationen über zwei neue Wissenszweige, die Mechanik und die Fallgesetze betreffend. 1. – 6. Tag, Arcetri, 6. März 1638, {1}

- hg. Arthur v. Oettingen, Darmstadt 1964
- [Gerlach 1973] Reinhard Gerlach, Rausch und Konstruktion, Farbklang – Klangfarbe, NZ 1.1973, 10-19 {A, P}
- [Gnosh 1935] R. N. Gnosh, On the tone quality of pianoforte, JASA 7, 1935, 27-28 {8, P}
- [Goldstein 1973] J. L. Goldstein, An optimum processor theory for the central formation of the pitch of complex tones, JASA 54, 1973, 1496 ff {6}
- [Goldstine 1977] Herman H. Goldstine, A history of numerical analysis from the 16th through the 19th century, Springer, New York 1977 {8}
- [Gousset 1986] Bruno Gousset, La prééminence du timbre dans le langage musical de la mer de Debussy, Analyse musicale, 2e trimestre 1986, 37-45 {A}
- [Graf 1969a] Walter Graf, Zur Bedeutung der Klangfarbe im Musikerleben, in FS B. Szabolsi, Budapest 1969, p. 207 {A}
- [Graf 1969b] Walter Graf, Die musikalische Klangforschung, Wege zur Erfassung der musikalischen Bedeutung der Klangfarbe, G. Braun, Karlsruhe 1969, Z TQ 688 : 6 {A}
- [Green 1969] Burdette Lamar Green, The harmonic series from Mersenne to Rameau, an historical study of circumstances to its recognition and application to music {2,3}
- [Grey 1975] John M. Grey, An exploration of musical timbre using computer-based techniques for analysis, synthesis and perceptual scaling, PhD diss. Stanford University, Center for Computer Research in Music and Acoustics, Report No. STAN-M-2, 1975 (UMI 1987) {7, 8}
- [Grey 1977] John M. Grey, Multidimensional perceptual scaling of musical timbres, JASA, Vol. 61, No. 5, May 1977, 1270-1277 {7}
- [Grey et al. 1978] John M. Grey, John W. Gordon, Perceptual effects of spectral modifications on musical timbres, JASA 63, 1978, 1495-1500 {7}
- [Groddeck 1995] Wolfram Groddeck, Reden über Rhetorik, Zu einer Stilistik des Lesens, Stroemfeld/Nexus, Frankfurt a. M. 1995 {3, 4}
- [Gurlitt (ed) 1963]] Michael Praetorius, Syntagmatis Musici, Tomus Secundus, De Organographia, Wolfenbüttel 1619, Faksimile-Nachdruck, hg. Wilibald Gurlitt, Bärenreiter Kassel 1963 {2}
- [H]**
- [Hairer et al. 1995] E. Hairer, G. Wanner, Analysis by its History, Springer, New York 1995 {8, M}
- [Hällström 1832] Gustav Gabriel Hällström, Von den Combinationstönen, Poggendorfs Annalen, 24, 1832, 438-467 {4}
- [Handschin 1948] Jacques Handschin, Der Toncharakter, Eine Einführung in die Tonpsychologie, Atlantis, Zürich 1948 {5, 7}
- [Hart et al. 1934] Harry C. Hart, Melville W. Fuller, Walter Lusby, A percision study of piano touch and tone, JASA 6, 1934 {7, A, P}
- [Hauer (1918)] Josef Hauer, op. 13 Über die Klangfarbe {7}
- [Heidelberger 1994] Michael Heidelberger, Helmholtz' Erkenntnis- und Wissenschaftstheorie im Kontext der Philosophie und Naturwissenschaft des 19. Jahrhunderts, in: Universalgenie Helmholtz, Rückblick nach 100 Jahren, hg. Lorenz Krüger, Akademie Verlag, Berlin 1994, 168-185 {5}
- [Heinz 1967] Ulrich J. Heinz, Der Klang und sein Spektakel, in Melos 1967, p. 238 {A}
- [Helferich 1985] Christoph Helferich, Geschichte der Philosophie, J.B. Metzlersche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart 1985 {1}
- [Helmholtz 1852] Ueber die Theorie der zusammengesetzten Farben, Physiologisch optische Abhandlung, Unger Berlin 1852 {4}
- [Helmholtz 1856] Hermann von Helmholtz, Handbuch der physiologischen Optik, Leipzig 1856, 2. Auflage Hamburg/Leipzig 1885 {4, 7}

- [Helmholtz 1857] Hermann von Helmholtz, Ueber die physiologischen Ursachen der musikalischen Harmonie, 1857, hg. Fritz Krafft, Kindler 1971 {5}
- [Helmholtz 1859] Hermann von Helmholtz, Ueber die Klangfarbe der Vocale, Annalen der Physik und Chemie, Band CVIII, Leipzig 1859, 463–466 {5}
- [Helmholtz 1863] Hermann von Helmholtz, Die Lehre von den Tonempfindungen als physiologische Grundlage für die Theorie der Musik, Vieweg, Braunschweig 1863 {5}
- [Helmholtz 1867] Hermann von Helmholtz, Handbuch der physiologischen Optik, 1867, 2. Auflage, Hamburg/Leipzig 1885 {4, 7}
- [Helmholtz ⁵1896] Hermann von Helmholtz, Die Lehre von den Tonempfindungen als physiologische Grundlage für die Theorie der Musik, Vieweg, Braunschweig 1895 {5}
- [Helmholtz 1898] Hermann von Helmholtz, Vorlesungen über die mathematischen Prinzipien der Akustik, hg. Arthur König und Karl Runge, Verlag von Johann Ambrosius Barth, Leipzig 1898 {7}
- [Helmholtz, du Bois 1846-1894] Dokumente einer Freundschaft. Briefwechsel zwischen Hermann von Helmholtz und Emil du Bois-Reymond 1846–1894, hg. Christa Kirsten, Akademie Verlag, Berlin 1986 {5}
- [Herder 1768] Johann Gottfried Herder, Ueber die neuere deutsche Literatur. Fragmente, 2. Aufl. 1768, / Johann Gottfried Herder, Werke in zehn Bänden ; Bd. 1: Frühe Schriften, 1764-1772 / hrsg. v. Ulrich Gaier 1985 {3}
- [Herder 1772] Johann Gottfried Herder, Abhandlung über den Ursprung der Sprache, Erich Heintel (hg.), Johann Gottfried Herder, Sprachphilosophische Schriften, Felix Meiner, Hamburg 1975, 1-90 {3}
- [Hermann 1894] L. Hermann, Beiträge zur Lehre von der Klangwahrnehmung, Arch. f. d. ges. Physiol. 56, 1894 {6}
- [Hermann 1896] L. Hermann, Zur Frage betreffende den Einfluss der Phasen auf die Klangfarbe, Poggendorfs Annalen, 58, 1896, 391–401 {6}
- [Hesse 1972] Horst-Peter Hesse: Die Wahrnehmung von Tonhöhe und Klangfarbe als Problem der Hörtheorie, Diss. Univ. Hamburg, Veröffentlichungen des staatlichen Instituts für Musikforschung preussischer Kulturbesitz Bd. VI, Arno Volk Verlag, Köln 1972 {4, 6, 7}
- [Hesse 1974] Horst-Peter Hesse: Zur Tonhöhenwahrnehmung, Experimentelle Überprüfung des Ohmschen Gesetzes der Akustik. Hamburger Jahrbuch für Musikwissenschaft, Bd. 1, hg. C. Floros et al., Hamburg 1974 {4,7}
- [Hiebert, Hiebert 1994] Elfrieda und Erwin Hiebert, Musical Thought and Practice: Links to Helmholtz's Tonempfindungen, in: Universalgenie Helmholtz, Rückblick nach 100 Jahren, hg. Lorenz Krüger, Akademie Verlag, Berlin 1994, 295–311 {5}
- [Hine 1996] Ellen McNiven Hine, Jean-Jacques Dortous de Mairan and the Geneva connection: scientific networking in the eighteenth century. Studies on Voltaire and the Eighteenth Century 340, Voltaire Foundation, Oxford 1996 {3}
- [Hire 1716a] Experiences sur le Son, Memoires de l'Academie Royale 1716, 262-264 {3}
- [Hire 1716b] Continuation d'Experiences sur le Son, Memoires de l'Academie Royale 1716, 264-268 {3}
- [Hoke (ed) et al. (ed) 1979] Models of the auditory system and related signal processing techniques, Ed. M.Hoke, E. de Boer, Proceedings from the workshop held at Münster, Federal Republic of Germany September 1978, Münster 1979 {P}
- [Houtsma 1997] A.J.M. Houtsma: Pitch and Timbre: Definition, Meaning and Use. Journal of new Music Research, Vol. 26 (1997), 104–115 {P}

[J]

- [Jackendoff et al. 1983] R. Jackendoff, F. Lehrdahl: A generative theory of tonal music, MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1983 {7}
- [Jakob 1995] Friedrich Jakob, Die Orgel und die Farbe, Verlag Orgelbau Kuhn Männedorf, Bern 1995 {4}
- [Jaucourt 1765] Louis Chevalier de Jaucourt, Encyclopédie 1765, Arikel: Timbre, Voix (Bd. 16) {3}
- [Jean Paul 1804] Jean Paul, Flegeljahre, Insel taschenbuch 873, Insel Verlag 1986 {4}
- [Jean Paul ²1813] Jean Paul, Vorschule der Ästhetik, 1804, 2. Auflage 1813, Nach der Ausg. von Norbert Miller, Felix Meiner Verlag, Hamburg 1990 {4}
- [Jenkins 1961] Robert A. Jenkins, Perception of Pitch, Timbre, and Loudness, JASA 33, 1961, 1550–1557 {P}
- [Jewansky 1999] Jörg Jewansky, Ist C = Rot? Eine Kultur- und Wissenschaftsgeschichte zum Problem der wechselseitigen Beziehung zwischen Ton und Farbe, Von Aristoteles bis Goethe, Berliner Musik Studien 17, Studio, Verlag Schewe, Sinzig 1999 {4, A}
- [Jost 2001] Peter Jost, Zum Begriff der „Klangfarbe“, Musiktheorie 2001, Heft 2, 181–183 {4}
- [Jost E. 1969] Ekkehard Jost, Über den Einfluß der Darbietungsdauer auf die Identifikation von instrumentalen Klangfarben, Jb. des staatl. Instituts für Musikforschung, 1969, p. 83 {P}

[K]

- [Kafker, Kafker 1988] Frank A. Kafker, Serena L. Kafker, The Encyclopedists as individuals: a biographical dictionary of the authors of the *Encyclopédie*, The Voltaire Foundation, Oxford 1988 {3}
- [Käuser 2001] Andreas Käuser, Ut pictura poesis - ut musica poesis, Modifikationen und Modalitäten von Anschaulichkeit um 1800. In: Schneider H. Et al (ed) 2001, 229–247 {4}
- [Kehr 1912] Karl Kehr, Die moderne Orgel, Leipzig 1912 {3}
- [Kemp 1979] E. T. Kemp, The evoked cochlear mechanical response and the auditory microstructure – Evidence for an new element in cochlear mechanics, Models of the auditory system and related signal processing techniques, Scand. Audiol. Suppl. 9, Münster 1979, 36–47 {P}
- [Kempelen 1791] Wolfgang Ritter von Kempelen, Mechanismus der menschlichen Sprache nebst Beschreibung seiner sprechenden maschine, Wien 1791
- [Kendall et al. 1991] Roger A. Kendall, Edward C. Carterette, Perceptual Scaling of Simultaneous Wind Instrument Timbres, Music Perception, Summer 1991, Vol. 8, No. 4, 369–404 {7}
- [Kim et al. 1979] D. O. Kim, J. H. Siegel, C. E. Molnar, Cochlear nonlinear phenomena in two-tone response, Models of the auditory system and related signal processing techniques, Scand. Audiol. Suppl. 9, Münster 1979, 64–81 {P}
- [Kirsten (ed) 1986] Dokumente einer Freundschaft. Briefwechsel zwischen Hermann von Helmholtz und Emil du Bois-Reymond 1846–1894, hg. Christa Kirsten, Akademie Verlag, Berlin 1986 {5}
- [Klein 1973] Ulrich Klein, Aristoteles, Über das Hörbare, Übersetzung, Einleitung und Kommentar, Stuttgart, 1972 {2}
- [Klump et al. 1950] Roy G. Klump, James P. Egan, On the correspondance between the intensities of two tones for best beats, JASA 23, 1950, 113–114 {6, P}
- [Koch 1802] Heinrich Christoph Koch, Musikalisches Lexikon, welches die theoretische und praktische Tonkunst, encyclopädisch bearbeitet, alle alten und neuen

- Kunstwörter erklärt, und die alten und neuen Instrumente beschrieben, enthält, Frankfurt 1802, Nachdruck Georg Olms Hidesheim, 1964
- [Kock 1935] Winston E. Kock, On the principle of uncertainty in Sound, JASA 7, 1935, 56-58] {8, P}
- [Kock 1936] Winston E. Kock, Certain subjective phenomena accompanying a frequency vibrato, JASA 8, 1936, 23-25
- [Koenig 1876] Rudolph Koenig, Über den Zusammenklang zweier Töne, Annalen der Physik 157, 1876, 177-237 {6}
- [Koenig 1881a] Rudolph Koenig, Über den Ursprung der Stöße und Stoßtöne bei harmonischen Intervallen, Annalen der Physik 12, 1881, 335-349
- [Koenig 1881b] Rudolph Koenig, Bemerkungen über die Klangfarbe, Annalen der Physik und Chemie, 14, 1881, 369-393
- [Koenig 1896] Rudolph König, Die Wellensirene, Wied. Ann. 57, 1896, 339-
- [Köhler 1987] Wolfgang Köhler, Die Blasinstrumente aus der "Harmonie Universelle" des marin Mersenne. Übersetzung und Kommentar des "Livre cinquiesme des instrumens à vent" aus dem "Traité des instruments", Moeck Verlag, Celle 1987 {2 }
- [Kratzenstein 1782] Christian Gottlieb Kratzenstein, Sur la naissance et la fonction des voyelles, Journal de physique 21, 1782, 358-380 {3}
- [Krämer 1991] Sybille Krämer, Kalkül und Rationalismus im 17. Jahrhunder, Walter de Gruyter, Berlin, New York, 1991
- [Krauss 1991] Hans Krauss: Zum Problem der Verschmelzung von Instrumentalklangfarben, Jb. des staatl. Inst. f. Musikforschung; Mesreburger, Berlin, Kassel, 1991, 7-110
- [Krüger 1994 (ed)] Universalgenie Helmholtz, Rückblick nach 100 Jahren, hg. Lorenz Krüger, Akademie Verlag, Berlin 1994, 295-311 {4, 5}
- [Kuile 1902] E. ter Kuile, Einfluß der Phasen auf die Klangfarbe, Pflügers Archiv f. d. ges. Physiologie, 89, 1902, 333-426 {6}
- [L]**
- [Lagrange 1867] Joseph Louis Lagrange, Recherches sur la nature et la propagation du son, Miscellanea Philosophico-Mathematica Societatis Privatae Taurinensia 1, I-X, 1759, 1-112 -> M. J.-A. Serret, Oeuvres de Lagrange Bd.1 Paris 1867, 39-148
- [Lagrange 1867b] Joseph Louis Lagrange, Nouvelle recherches sur la nature et la propagation du son, Miscellanea Philosophico-Mathematica Societatis Privatae Taurinensia 2, I-X, 1759, 11-172 -> M. J.-A. Serret, Oeuvres de Lagrange Bd.1 Paris 1867, 151-316
- [Langner 1997] Gerald Langner, Temporal Processing of Pitch in the Auditory System. Journal of new Music Research, Vol. 26 (1997), 116-132 {P}
- [Le Timbre 1991] Le Timbre, Métaphore pour la Composition, IRCAM, hg. Christian Bourgois, 1991 {A}
- [Lechleitner 1989] Gerda Lechleitner: Klangfarbenétude, Studien zum Bolero von Maurice Ravel, Wiener Veröffentlichungen zur Musikwissenschaft, hg. Othmar Wessely, Hans Schneider, Tutzing 1989 {A}
- [Lehrdahl 1987] Fred Lehrdahl, Timbral hierarchies, Contemporary Music review, 1987, Vol. 2, 135-160 {7}
- [Leisinger 1994] Ulrich Leisinger, Leibniz-Reflexe in der deutschen Musiktheorie des 18. Jahrhunderts, Königshausen & Neumann, Würzburg 1994 {3}
- [Leman 1997] Marc Leman, The convergence paradigm, ecological modelling, and context-dependent pitch perception, Journal of New Music Research, Vol.

- 26 (1997), 133–153
- [Lenihan 1951] J. M. A. Lenihan, Mersenne and Gassendi. An early chapter in the history of sound. *Acustica* 1, 1951, 96–99 {2}
- [Lenoble 1943] Robert Lenoble, Mersenne ou la naissance du mécanisme, Bibliothèque d'histoire de la philosophie, Paris 1943. (478–486) {1, 2}
- [Lewis et al. 1933] D. Lewis, S. N. Reger, An experimental study of the role of the timpanic membrane and the ossicles in the hearing of certain subjective tones, *JASA* 5, 1933, 153–158 {6}
- [Lewis et al. 1935] Don Lewis, Milton Cowan, The influence of intensity on the pitch of violin and 'cello tones, *JASA* 8, 1936, 20-139 {P}
- [Lichtenhahn 1983a] Ernst Lichtenhahn, "Lebendigtote Dinger" - Zur romantischen Auffassung von musikinstrument und Klangwirklichkeit, Fs. Hans Conradin zum 70. Geburtstag, Hg. Volker Kalisch, Ernst Meier, Joseph Willmann und Alfred Zimmerlin, Verlag Paul Haupt Bern 1983 {4}
- [Lichtenhahn 1983b] Ernst Lichtenhahn, Zur Instrumentenästhetik im frühen 19. Jahrhundert, in *Alte Musik Praxis und Reflexion*, Hg. Peter Reidemeister und Veronika Gutmann, Amadeus 1983 {4}
- [Licklider 1951] J. C. R. Licklider, A Duplex Theory of Pitch Perception, *Experientia* 7, 1951, 128 {P}
- [Licklider 1954a] J. C. R. Licklider, "Periodicity" Pitch and "Place" Pitch, *JASA* 26, 1954, 945 {6}
- [Licklider 1954b] J. C. R. Licklider, Effects of change in the phase pattern upon the sound of a 16-harmonic tone, *JASA* 29, 1957, 780 {6}
- [Licklider 1956] J. C. R. Licklider, Auditory Frequency Analysis, in: *Information Theory, Proc. 3rd London Symposium On Information Theory*, ed. Colin Cherry, Butterworths Scientific publications, 1956, 253–268 {6}
- [Licklider et al. 1950] J. C. R. Licklider, J. C. Webster, The discriminability of interaural phase relations in two-component tones, *JASA* 22, 1950, 191-195
- [Lindsay 1966] R. Bruce Lindsay, The story of acoustics, *JASA* 39, 1966, 629-644 {A}
- [Lorenz 1973] Lorenz, Alfred: Neue Gedanken zur Klangspaltung und Klangverschmelzung, in: *FS Arnold Schering zum 60. Geburtstag*, pp. 137ff {A}
- [Ludwig 1935] Hellmut Ludwig, Marin Mersenne und seine Musiklehre, Beiträge zur Musikforschung 4, Buchhandlung des Waisenhauses G.m.b.H. Halle/Saal, Berlin 1935 {2}
- [Lüscher et al. 1949] E. Lüscher, J. Zwislowski, Adaptation of the ear to sound stimuli, *Jasa* 21, 1949, 135-139 {P}
- [M]**
- [Macdonald 2002] Hugh Macdonald, Berlioz's Orchestration Treatise, A Translation and Commentary, Cambridge University Press, Cambridge 2002 {4}
- [Maehder 1978] Jürgen Maehder, Die Poetisierung der Klangfarben in Dichtung und Musik der deutschen Romantik, *Aurora* 38, 1978, 9-31 {4}
- [Mahoney www] Micheal S. Mahoney (Princeton University), Sketching science in the seventeenth century, <http://www.princeton.edu/~hos/mike/articles/whysketch/whysketch.html> {1,2,}
- [Mairan 1720] Diverses observations de physique generale. IV. Histoire de l'Académie Royale des Sciences, 1720, Avec les Memoires de Mathematique & de Physique, pour la même Année. Paris 1722; 11-12 {3}
- [Mairan 1737] Discours sur la Propagation du Son dans les differents Tons qui le modifient. Memoires de Mathematique & de Physique 1737, 1-20] Eclaircissements sur le Discours Precedent. Memoires de Mathematique & de Physique 1737, 20 – 60 {3}
- [Malherbe 1990] Michel Malherbe: Mathématiques et Sciences physiques dans le "Discours {3}

- préliminaire” de l’Encyclopédie, Recherches sur Diderot et sur l’Encyclopédie, 9, octobre 1990, 109-146
- [Marin et al. 1991] Cécile M. H. Marin, Stephen McAdams: Segregation of concurrent sounds. II: Effects of spectral envelope tracing, frequency modulation coherence, and frequency modulation width, JASA 1991 {7}
- [Mathes et. al. 1947] R. C. Mathes, R. L. Miller, Phase Effects in Monaural Perception, JASA, Vol. 19.5, 1947, 780-797 {7}
- [Mattheson 1748] Johann Mattheson, Aristoxeni iunior, Phtonologia systematica, Versuch einer systematischen Klanglehre, Hamburg 1748 Vol. 19.5, 1947, 780-797 {3}
- [Mayer 1876] A. M. Mayer, Phil. Mag. 11, 500, 1876 {5, P}
- [Mazzola 1990] Guerino Mazzola: Geometrie der Töne, Elemente der Mathematischen Musiktheorie, Unter Mitarbeit von Daniel Muzzulini und einem Beitrag von Georg Rainer Hoffmann, Birkhäuser, Basel 1990 {7, 8}
- [Mc Adams et al. 1991] Stephen McAdams, Kaija Saariaho, Qualité et fonctions du timbre musical. In: Le Timbre(1991), 164–180 {A}
- [Mc Adams et al. 1992] Stephen McAdams, Jean-Christophe Cunibile: Perception of timbral analogies, Philosophical Transactions of the Royal Society (vol 336), London Series B, 1992 {7}
- [Mc Adams et al. 1995] Mc Adams, Stephen; Winsberg, Suzanne; Donnadieu, Sophie; De Soete, Geert, Krimphoff, Jochen: Perceptual scaling of synthesized musical timbres: Common dimensions, specificities, and latent subject classes, Psychol Res (1995) 58: 177-192 {7}
- [Mc Adams et al. 2000] Mc Adams, Stephen; Winsberg Suzanne, Psychophysical quantification of individual differences in timbre perception. Contributions to Psychological Acoustics, Results of the Eight Oldenburg Symposium on Psychological Acoustics, Bibliothek- und Informationssystem der Universität Oldenburg, 2000, 165-180 {7}
- [McDonald 2000] Patrick. J. McDonald, Demonstration by simulation: the central place of experiment in Helmholtz's theory of perception, University of Notre Dame, 2000, <http://hypatia.ss.uci.edu/lps/psa2k/demonstration-by-simulation.pdf> {5}
- [Meddis et al. 1991] R. Meddis, M. J. Hewitt: Virtual pitch and phase sensitivity of a computer model of the auditory periphery, I: Pitch identification, II: Phase sensitivity, JASA 98, 1991, 2866–2894 {6}
- [Meier et al. 2000] Andreas Meier, Thomas Wüst, Objektorientierte und objektrelationale Datenbanken, Ein Kompaß für die Praxis, dpunkt.verlag Heidelberg ²2000 {7}
- [Mersenne 1636] Marin Mersenne, Harmonie Universelle, Paris 1636, Reprint: Centre National de la Recherche scientifique, Paris 1975 {2}
- [Mertens 1975] Paul-Heinrich Mertens, Die Schumannschen Klangfarbengesetze und ihre Bedeutung für die Übertragung von Sprache und Musik, Diss. Univ. Köln, Verlag Erwin Bochinsky, Frankfurt a. M. 1975 {7}
- [Meßwarb 1997] Katja Meßwarb, Instrumentationslehren des 19. Jahrhunderts, Europäische Hochschulschriften, Reihe XXXVI Musikwissenschaft, Bd. 171, Peter Lang, Frankfurt 1997 {4}
- [Meyer-Eppler 1969] Werner Meyer-Eppler, Grundlagen und Anwendungen der Informationstheorie, Springer: Berlin 1959, ²1969 {8}
- [Meyering 1989] Theo C. Meyering, Historical roots of cognitive science, The rise of a cognitive theory of perception from antiquity to the nineteenth century, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Boston, London, 1989 {5}
- [MGG ²1994] Wolfgang Auhagen , Roland Eberlein, Manfred R. Schroeder, Andreas Eilemann: Akustik, 366-421 {L, A}
- [Mol 1970] H. Mol, Acoustical models generating the formants of the vowel phonemes, Fundamentals of Phontics II, Mouton: The Hague, Paris 1970 {5, 7}
- [Muzzulini 1985] Klangfarbenmelodien – Aspekte zur Klangklassifizierung (unveröffentlicht) {6}

- [Muzzulini 1991] Konsonanz und Dissonanz in Musiktheorie und Psychoakustik, Lizentiatsarbeit, Univ. Zürich 1991 {3}
- [Muzzulini 1994] [Daniel Muzzulini: Leonhard Eulers Konsonanztheorie, Musiktheorie 1994, Heft 2, 135 – 146 {3}
- [Muzzulini 2000] Daniel Muzzulini, Klänge und Farben - Spektren in der Akustik und Optik, in: Musik denken, Ernst Lichtenhahn zur Emeritierung, Peter Lang, Bern 2000, 255 –269 {4, 7}
- [Muzzulini 2001] Daniel Muzzulini, Timbre vs. Klangfarbe, Musiktheorie 2001, Heft 1, 81 – 84 {3, 4}
- [Myschkis 1981] Anatolij D. Myschkis, Angewandte Mathematik für Physiker und Ingenieure, Verlag Harri Deutsch, Thun, Frankfurt a. M., 1981 {8, M]
- [N]**
- [Newman et al. 1937] E. B. Newman, S. S. Stevens, H. Davis: Factors in the production of aural harmonics and combination tones, JASA, 9, 1937, 107-118 {6}
- [Nitsche 1970] Peter Nitsche, Zur Wahrnehmung der Klangfarbe. Ein Beitrag zur Methode von Klanguntersuchungen, in Zeitschrift für Musiktheorie, Jg. 1, Heft 2, 1970, p. 8 {6}
- [Nitsche 1972] Peter Nitsche, Zur Wahrnehmung der Klangfarbe II, zfmth, Jg. 3, Heft 1, p. 16 {6}
- [Nitsche 1978] Peter Nitsche, Klangfarbe und Schwingungsform, Berliner Musikwissenschaftliche Arbeiten Band 13, Katzbachler, München-Salzburg 1978 {6}
- [O]**
- [Ohm 1839] Georg Simon Ohm, Bemerkungen über Combinationstöne und Stöße, Poggendorf's Annalen der Physik und Chemie, Band XXXXVII, 1839, 463–466 {4}
- [Ohm 1843] Georg Simon Ohm, Ueber die Definition des Tones, nebst daran geknüpfter Theorie der Sirene und ähnlicher tonbildender Vorrichtungen, Poggendorf's Annalen der Physik und Chemie, Band LIX, 1843, 497–565 {4}
- [Ohm 1844] Georg Simon Ohm, Noch ein Paar Worte über die Definition des Tones, Poggendorf's Annalen der Physik und Chemie, Band LXII, 1844, 1–18 {4}
- [Onchi 1949] Yutaka Onchi, A study of the mechanism of the middle ear, JASA 21, 1949, 404-410 {6, P}
- [P]**
- [Palisca 1989] Claude V. Palisca, Die Jahrzehnte um 1600 in Italien, Italienische Musiktheorie im 16. und 17. Jahrhundert, Antikenrezeption und Satzlehre, Geschichte der Musiktheorie Band 7, Wissenschaftliche Buchgesellschaft Darmstadt, 1989, 221-306 {1}
- [Pfeiffer et al. 1994] Jeanne Pfeiffer, Amy Dahan-Dalmedico, Wege und Irrwege – Eine Geschichte der Mathematik, Mit einem Vorwort von D. Laugwitz, Aus dem Französischen von Klaus Volkert, Birkhäuser, Basel 1994 {1, M}
- [Pielemeier et al. 1996] William J. Pielemeier, Gregory H. Wakefield, Mary H. Simoni, Time-frequency Analysis of musical signals, Proceedings of the IEEE 84, 1996, 1216–1230 {P}
- [Piencikowsky 1986] Robert Piencikowsky, Fonction relative du timbre dans la musique contemporaine: Messiaen, Carter, Boulez, Stockhausen, Analyse musicale, 2e trimestre 1986, 51–53 {A}
- [Pierce 1989] John R. Pierce, Klang, Musik mit den Ohren der Physik, 2. Aufl., Spektrum der Wissenschaften, Heidelberg 1989 {5, 6, 7, P}

- [Pinkus et al. 1997] Allan Pinkus, Samy Zafrany, *Fourier Series and Integral Transforms*, Cambridge University Press, 1997 {8, M}
- [Pistone 1986] Danièle Pistone, les alliances de timbres dans les traités d'orchestration français, *Analyse musicale*, 2e trimestre 1986, 27–30 {4}
- [Plomp 1976] Reinier Plomp: *Aspects of Tone Sensation, A Psychophysical Study*, Academic Press London, 1976 {6, 7}
- [Plomp et al. 1969] R. Plomp, H.J.M. Steeneken, Effect of phase on the timbre of complex tones, *JASA* Vol 46(2) 1969, 409-421 {7}
- [Poisson 1668] Eclaircissements sur la Musique de Descartes (Elucidationes physicae in Cartesi musicam), Paris 1668 in René Decartes *Abrégé de Musique*, Meridiens Klincksieck, Paris 1990 {2}
- [Poli et al. 1997] Giovanni De Poli, Paolo Brandoni: Sonological Models for Timbre Characterization, *Journal of new Music Research*, Vol. 26 (1997), 170–197 {7}
- [Praetorius 1619/II] *Syntagmatis Musici, Tomus Secundus, De Organographia*, Wolfenbüttel 1619, Faksimile-Nachdruck, hg. Wilibald Gurlitt, Bärenreiter Kassel 1963 {2}
- [Pratt 1976] R. L. Pratt, P. E. Doak, A subjective rating scale for timbre, *Journal of Sound and Vibration*, 45, 1976, 317 {7}
- [Pressnitzer et al. 2000] Pressnitzer, Daniel; Mc Adams, Stephen; Winsberg Suzanne; Fineberg, Joshua, Perception of musical tension for nontonal orchestral timbres and its relation to psychoacoustic roughness, *Perception & Psychophysics* 2000, 62(1), 66-80 {6, 7}
- [Pressnitzer et al. 1999] Daniel Pressnitzer, Mc Adams, Stephen, Two phase effects in roughness perception, *JASA* 105 (5), 1999, 2773-2782 {6}
- [Q]**
- [Qualitätsaspekte 1988] Qualitätsaspekte bei Musikinstrumenten, Beiträge zu einem Kolloquium. Hg. Jürgen Meier, Moeck Verlag, Celle 1988 {A}
- [R]**
- [Rahlf's 1966] Volker Rahlfs, *Psychometrische Untersuchungen zur Wahrnehmung musikalischer Klänge*, Diss. Univ. Hamburg, 1966 {7}
- [Rameau 1722] *Traité de l'harmonie réduite à ses principes naturels*, 1722, Jean-Philippe Rameau, *Complete Theoretical Writings*, hg. Erwin Jacobi, Vol. 1, American Institute of Musicology, 1967 {3}
- [Rameau 1726] *Nouveau Système de musique théorique*, 1726, Jean-Philippe Rameau, *Complete Theoretical Writings*, hg. Erwin Jacobi, Vol. 2, American Institute of Musicology, 1967 {3}
- [Rameau 1737] *Génération harmonique*, 1737, Jean-Philippe Rameau, *Complete Theoretical Writings*, hg. Erwin Jacobi, Vol. 3, American Institute of Musicology, 1967 {3}
- [Rao et al. 1998] Raghuveer, M. Rao, Ajit S. Bopardikar: *Wavelet Transforms, Introduction to Theory and Applications*, Addison-Wesley: Reading, Massachusetts 1998 {8, M}
- [Rayleigh 1887] Lord Rayleigh (John William Strutt), *The theory of sound*, London 1887, 2. Aufl. 1894 dt.: *Die Theorie des Schalls*, Braunschweig 1889) {A}
- [Reinecke 1967] H.-P. Reinecke, *Klangfareb*, Riemann Musik Lexikon, Sachteil, 1967, 457-459 {7}
- [Reuter 1995] Christoph Reuter, *Der Einschwingvorgang nichtperkussiver Musikinstrumente. Auswertung physikalischer und psychoakustischer Messungen*. Reihe XXXVI Musikwissenschaft, Bd. 148, Peter Lang, Frankfurt am Main, 1995 {7, 8}
- [Reuter 1996] Christoph Reuter, *Die auditive Diskrimination von Orchesterinstrumenten*. Europäische Hochschulschriften, Reihe XXXVI Musikwissenschaft, Bd. 162, Peter Lang, Frankfurt am Main, 1996 {7, P}

- [Riemann ²1921] Hugo Riemann, Geschichte der Musiktheorie im IX.-XIX. Jahrhundert, ²1922 Max Hesse Berlin, Olms: Hildesheim, Zürich, New York 1990 {A}
- [Risset 1986] Jean-Claude Risset, Timbre et synthèse des sons, Analyse musicale, 2e trimestre 1986, 9–20 {7}
- [Risset 1991] Jean-Claude Risset, David Wessel: Exploration du timbre par analyse et synthèse. In: Le Timbre(1991), 103–131 {7}
- [Ritsma 1962] R. J. Ritsma, Existence region of the tonal residue, I, JASA 34, 1962, 1224–1229 {6, 4}
- [Robbins 1952] Joseph G. Robbins, The acoustic significance of the amplitude and phase of harmonics present in a source of sound in a room, JASA 24(54), 1952, 380–383 {6, P}
- [Roederer 1977] Juan G. Roederer, Physikalische und psychoakustische Grundlagen der Musik, Springer, Heidelberg 1977 {P}
- [Rösing 1972] Helmut Rösing, Die Bedeutung der Klangfarbe in traditioneller und elektronischer Musik, Musikverlag Emil Katzschler, München 1972 {A}
- [Rousseau 1749] Encyclopédie 1765, Artikel: Sensation / Son (Bd. 15), Tymbre, Voix (Bd. 16) {3}
- [Rousseau 1762] Emile {3}
- [Rousseau 1768] Dictionnaire de Musique, 1768 {3}
- [Rousseau 1979] Jean-Jacques Rousseau, Ecrits sur la Musique, Préface de Catherine Kintzler, Editions Stock, 1979 {3}
- [Ru et al. 1997] Powen Ru, Shibab A. Shamma, representation of musical timbre in the auditory cortex, Journal of New Music Research, Vol 26 (1997), 154–169 {5, 7}
- [Russell 1929] G. Oskar Russell, The mechanism of speech, JASA 1929, 83 ff {A}
- [S]
- [Sandell www] Greg Sandell, Definitions of the word "Timbre", <http://sparky.ls.luc.edu/sandell/sharc/timbredef.html> {4, A}
- [Sauveur 1700] Joseph Sauveur, Sur la détermination d'un son fixe. Histoire de l'Académie Royale des Sciences. Année 1700, Seconde Edition, revue, corrigé & augmentée, Chez Pierre Mortier, Amsterdam 1734, 182–195 {3}
- [Sauveur 1701] Joseph Sauveur: Principes d'acoustique et de musique ou système général des intervalles des sons. Paris 1701. Minkoff Reprint, Genf 1973 {3}
- [Sauveur 1713] Joseph Sauveur, Collected writings on musical acoustics, hg. Rudolph Rasch, The Diapason Press, Utrecht 1984 {3}
- [Schiemann 1994] Georg Schieman, Die Hypothesierung des Mechanismus bei Hermann von Helmholtz, Ein Beitrag zum Wandel der Wissenschafts- und Naturauffassung im 19. Jahrhundert, in: Universalgenie Helmholtz, Rückblick nach 100 Jahren, hg. Lorenz Krüger, Akademie Verlag, Berlin 1994, 149–167 {5}
- [Schläpfer 1993] Farbmetrik in der Reproduktionstechnik und im Mehrfarbendruck, UGRA, St. Gallen ²1993] {4, 7}
- [Schmusch 1994] Rainer Schmusch: Klangfarbenmelodie, Handwörterbuch der musikalischen Terminologie, Orner III, (22. Auslieferung Sommer 1994) Franz Steiner Verlag Stuttgart {7}
- [Schneider 1997] Albrecht Schneider, Tonhöhe Skala Klang, Akustische, tonometrische und psychoakustische Studien auf vergleichender Grundlage, Orpheus, Verlag für systematische Musikwissenschaft, Bonn 1997 {A}
- [Schneider H. Et al (ed) 2001] Helmut J. Schneider, Ralf Simon, Thomas Wirtz (ed), Bildersturm und Bilderflut um 1800, Zur schwierigen Anschaulichkeit der Moderne, Aisthesis Verla, Bielefeld 2001 {4}

- [Schönberg 1911] Arnold Schönberg, Harmonielehre, Universal-Edition, Leipzig-Wien 1911 {7}
- [Schönberg 1956] Arnold Schönberg, Prophetische Visionen, in Melos 1956, p. 33 {A}
- [Schönberg 1966] Arnold Schönberg, Harmonielehre, Universal-Edition, Leipzig-Wien 1966 {7}
- [Schönberg 1969] Arnold Schönberg, Über Klangfarbe, in Melos 1969, p. 206 {7}
- [Schönberg 1992] Stil und Gedanke, hg. Ivab Voitech, Fischer Taschenbuch Verlag, Frankfurt 1992 {7, A}
- [Schouten 1938] J. F. Schouten, The Perception of Subjective Tones, Proc. Koninkl. Ned. Akad. Wetenschap. 41, 1938, 1086–1093 {6}
- [Schouten 1940] J. F. Schouten, The Residue a New Component in Subjective Sound Analysis, Proc. Koninkl. Ned. Akad. Wetenschap. 43, 1940, 356–365 {6}
- [Schouten 1940b] J. F. Schouten, Die Tonhöhenempfindung, Philips' Technische Rundschau. 5, 1940, 294–302 {6}
- [Schouten 1968] J. F. Schouten, The perception of timbre, Reports of the 6th Intern. Congress on Acoustics, Tokyo 1968
- [Schouten et al. 1962] J. F. Schouten, R. J. Ritsma, B. Lopes Cardozo, Pitch of the Residue, JASA 34, 1962, 1418–1424 {6}
- [Schroeder 1959] M. R. Schroeder, New results concerning monaural phase sensitivity, JASA 31, 1959, 1579 {6}
- [Schüling 1969] Hermann Schüling, Die Geschichte der axiomatischen Methode im 16. und beginnenden 17. Jahrhundert, Georg Olms Verlag Hildesheim, New York 1969 {1}
- [Schulisch 1983] Olga Schulisch, Wahrnehmungstheorien bei Hermann von Helmholtz und ihre semiotische Analyse, Universität Stuttgart, Institut für Philosophie, Pädagogik und Psychologie {5}
- [Schulte 1967] Gerhard Schulte, Untersuchungen zum Phänomen des Tonhöreneindrucks bei verschiedenen Vokalfarben, Kölner Beiträge zur Musikforschung, Bd. 46, Gustav Bosse Verlag, Regensburg 1967 {5,7}
- [Schumann 1923] Karl Erich Schumann, Die Garten'schen Beiträge zur Vokallehre, Arch. f. Mw. 5, 1923. 71–74
- [Schumann 1925] Karl Erich Schumann, Akustik, Ferdinand Hirt in Breslau 1925 {7}
- [Schumann 1929] Karl Erich Schumann, Die Physik der Klangfarben, Habilschrift, Berlin 1929
- [Schumann 1973] Karl Erich Schumann, Zur Physik der Vokalklangfarben, FS K. G. Fellerer zum 70. Geb., hg. H. Hüsch, Köln 1973
- [Schürgel 1970] Kurt Schürgel, Zeitfunktion und Spektrum in der subjektiven Akustik, FS. Walter Graf zum 65. Geburtstag, Wiener Musikwissenschaftliche Beiträge Bd. 9, Wien - Köln - Graz 1970, {7, 8}
- [Seashore 1938] Carl E. Seashore, Psychology of Music, McGraw-Hill Publications in Psychology, New York 1938 {A}
- [Seebeck 1843] August Seebeck, Ueber die Sirene, Poggendorf's Annalen der Physik und Chemie, Band LX 1843, 449–481 {4, 6}
- [Seebeck 1844a] August Seebeck, Ueber die Definition des Tones, Poggendorf's Annalen der Physik und Chemie, Band LXIII 1844, 353–368 {4, 6}
- [Seebeck 1844b] August Seebeck, Ueber die Erzeugung von Tönen durch getrennte Eindrücke, mit Beziehung auf die Definition des Tones, Poggendorf's Annalen der Physik und Chemie, Band LXIII 1844, 368–380 {4, 6}
- [Seebeck 1941] August Seebeck, Beobachtungen über einige Bedingungen der Entstehung von Tönen, Poggendorf's Annalen der Physik und Chemie, Band LIII 1841, 417–436s {4, 6}
- [Simowitz 1983] Amy Cohen Simowitz, Theory of Art in the *Encyclopédie*, Studie in the Fine Arts: Art Thory, No. 9, UMI Research Press, Ann Arbor, Michigan 1983 {3}

- [Sirker 1980] Sirker, Udo: Joseph Sauveurs musikakustische Untersuchungen, Ein Beitrag zu experimentellen Forschungen um 1700, Fs. Heinrich Hüschen zum 65. Geburtstag, hg. Detlef Altenburg, Gitarre und Laute Verlagsgesellschaft, Köln 1980, S. 412–415 {3}
- [Sivian et al. 1930] L. J. Sivian, H. K. Dunn, S. D. White, Absolute amplitudes and spectra of certain musical instruments and orchestras, JASA 2, 1930, 330–371 {7, A}
- [Slawson 1985] W. Slawson, Sound color, Berkeley CA, University of California Press, 1985
- [Small 1955] Arnold M. Small, jr, Some parameters influencing the pitch of amplitude modulated signals, JASA 27, 1955, 751–760 {6,7}
- [Smith 1749] Harmonics, or the philosophy of musical sounds, Cambridge 1749 {3, 8}
- [Smootenburg 1974] Guido F. Smootenburg, On the mechanisms of combination tone generation and lateral inhibition in hearing, In: Facts and models in hearing (1974), 322–343 {6}
- [Snow 1936] W. B. Snow, Change of pitch with loudness at low frequencies, JASA 8, 1936, 14–19 {P}
- [Sorge 1744] Georg Andreas Sorge, Anweisung zur Stimmung und Temperatur sowohl der Orgelwerke, als auch anderer Instrumente, sonderlich aber des Claviers. In einem Gespräche zwischen einem Musictheoretico und seinem Scholaren, Hamburg 1744 {3}
- [Spaten 1691] Spaten, Der Deutschen Sprache Stammbaum und Wortwachs oder Teutscher Sprachschatz, Nürnberg 1691 {2, 4}
- [Steinberg 1929] John C. Steinberg, Effects of distortion upon the recognition of speech sounds, JASA Oct. 1929, 121–137 {5, A, P}
- [Steinberg 1937] John C. Steinberg, Position of stimulation in the cochlea by pure tones, JASA 8, 1937 {5, 8, P}
- [Stevens 1935] S. S. Stevens, Relation of pitch to intensity, JASA 6, 1935, 150–154 {P}
- [Stevens et al. 1936] Psychophysiological acoustics: pitch and loudness, JASA 8, 1936, 1–13 {P}
- [Stevens et al. 1937] S. S. Stevens, J. Volkman, E. B. Newman, A scale for the measurement of the psychological magnitude pitch, JASA 8, 1937, 185–190 {P}
- [Stewart 1931] G. W. Stewart, Problems suggested by an uncertainty principle in acoustics, JASA Jan. 1931, 325–329 {8}
- [Stout 1938] Barrett Stout, The harmonic structure of vowels in singing in relation to pitch and intensity, JASA 10, 1938, 137–146 {7, A}
- [Straub 1929] W. Straub, Tonqualität und Tonhöhe, Arch. f. die ges. Psychologie 69, 1, 1929, 289–395 {7}
- [Stumpf 1918] Carl Stumpf, Die Struktur der Vokale, Sitz.-Ber. d. Preuß. Akad. d. Wiss., Berlin 1918, 333–358 {5, 7}
- [Sulzer 1771/1774] Johann Georg Sulzer, Allgemeine Theorie der Schönen Künste, Leipzig 1771/1774, Digitale Bibliothek Band 67, Directmedia, Berlin 2002 {3}
- [Suppan (ed) 1985] Bläserklang und Blasinstrumente im Schaffen Richard Wagners. Kongreßbericht Seggau/Österreich 1983, hg. Wolfgang Suppan, Hans Schneider, Tutzing 1985 {A}
- [T]**
- [Tartini 1754] Giuseppe Tartini, Trattato di musica secondo la vera scienza dell' armonia, Padova 1754, Reprint: Novecento, Palermo 1996 {3}
- [Terhardt 1974] Ernst Terhardt, Pitch of pure tones: its relation to intensity. In: Facts and models in hearing (1974), 353–360 {P}
- [Terhardt 1988] Ernst Terhardt, Psychophysikalische Grundlagen der Beurteilung musikalischer Klänge. In: Qualitätsaspekte (1988), 9–22 {A}

- [Terhardt et al. 1982] E. Terhardt, G. Stoll, M. Seewann: Pitch of complex signals according to virtual pitch theory, *JASA* 71, 1982, 671-678
- [Thies 1982] Wolfgang Thies; Grundlagen einer Typologie der Klänge, Schriftenreihe zur Musik, Band 20, Verlag Karl Dieter Wagner, Hamburg 1982 {7}
- [Thomson 1877/78] William Thomson, On beats of imperfect harmonies, *Proceedings of the Royal Society of Edinburgh*, Session 1877-78, Vol. IX, 602-612 {6}
- [Tolmie 1934] J. R. Tolmie, An analysis of the vibrato from the viewpoint of frequency and amplitude modulation, *JASA* 7, 1935 {6, 7, P}
- [Trendelenburg 1935] Ferdinand Trendelenburg, On the physics of speech sounds, *JASA* 7, 1935, 142-147 {7, P}
- [Trendelenburg 1950] Ferdinand Trendelenburg, Einführung in die Akustik, Springer, Berlin 1950 {A}
- [Trimmer et al. 1937] J. D. Trimmer, F. A. Firestone, An investigation of subjective tones by means of the steady tone phase effect, *JASA* 9, 1937, 24-29 {6}
- [Turner 1977] R. Steven Turner, The Ohm-Seebeck dispute, Hermann von Helmholtz and the origins of physiological acoustics, *The British Journal for the History of Science*, 10, 1-24 {4, 6}
- [U]**
- [Ullmann 1982] Dieter Ullmann, Helmholtz-Koenig-Waetzmann und die Natur der Kombinationstöne, *Centaurus* 29, 1982, 40-52 {4, 6}
- [Ullmann 1988] Dieter Ullman, Ohm-Seebeck-Helmholtz und das Klangfarbenproblem, NTM-Schriftenreihe Gesch. Naturwiss., Techn., Med., Leipzig 25.1, 1988, 65-68
- [Ullmann 1996] Dieter Ullmann, Chladni und die Entwicklung der Akustik von 1750-1860, *Science Networks, Historical Studies*, Bd. 19, Birkhäuser, Basel 1996 {3, 4, 5}
- [Universalgenie 1994] Universalgenie Helmholtz, Rückblick nach 100 Jahren, hg. Lorenz Krüger, Akademie-Verlag, Berlin 1994, 295-311 {5, 6, 7}
- [V]**
- [Valenzuela 1998] Miriam Noemi Valenzuela, Untersuchungen und Berechnungsverfahren zur Klangqualität von Klaviertönen, Herbert Utz Verlag, München 1998 {7,8}
- [Van Khê 1986] Trần Van Khê, Le timbre dans les traditions musicales de l'Asie, *Analyse musicale*, 2e trimestre 1986, 23-26 {A}
- [Verney 1683] Du Verney, Traité de l'organe de l'ouïe contenant la structure, les usages & les maladies de toutes les parties de l'oreille, Paris, 1683 {2, 3, 5}
- [Voigt 1985] Wolfgang Voigt, Dissonanz und Klangfarbe, Instrumentationsgeschichtliche und experimentelle Untersuchungen, Verlag für systematische Musikwissenschaft, Bonn 1985 {A}
- [W]**
- [Waard (ed) 1934] Loci Communes, Journal tenu par Isaac Beeckman de 1604 à 1634, Ed. C. de Waard, 4 Bände, Martinus Nijhoff, La Haye 1939 {2}
- [Walker 1999] James S. Walker, A Primer on Wavelets and their Scientific Applications, Chapman & Hall/CRC: Boca Raton 1999 {8, M}
- [Wallis 1677] Dr. Wallis's Letter to the Publisher, concerning a new Musical Discovery'; written from Oxford, March 14. 1676/7, *Philosophical Transactions*, The Royal Society of London, Vol. 12 1677, Johnson Reprint Corporation, Kraus Reprint Corporation, New York 1963, 840-842 {2}
- [Walliser 1969] K. Walliser, Zusammenhänge zwischen dem Schallreiz und der Periodentonhöhe, *Acustica* 21, 1969, 319-329 {6}

- [Walliser 1969b] K. Walliser, Zur Unterschiedsschwelle der Periodentonhöhe, *Acustica* 21, 1969, 329–336 {6}
- [Warner 1982] Daniel Warner, Notes from the timbre space, *Perception of New Music*, 1982/83, 15-22 {7}
- [Warren et al. 1951] On the accuracy of the method of best beats for determining the intensity of a tone, *JASA* 23, 1950, 111-113 {6, P}
- [Warren, Warren 1968] Warren, Richard M., Warren Roslyn P., *Helmholtz on Perception*, John Wiley & Sons, New York 1968 {5}
- [Weber 1829a] Wilhelm Weber, Ueber die Construction und den Gebrauch der Zungenpfeifen, *Annalen der Physik und Chemie*, 92.6, 16, 1829, 193–206 {4}
- [Weber 1829b] Wilhelm Weber, Versuche mit Zungenpfeifen, *Annalen der Physik und Chemie*, 92.6, 17, 1829, 415–439 {4}
- [Weber G. 1817] Gottfried Weber, Versuch einer geordneten Theorie der Tonsezkunst zum Selbstunterricht, Bd. 1, *Grammatik der Tonsezkunst*, Mainz 1817 {4}
- [Weber G. 1822] Allgemeine Musiklehre für Lehrer und Lehrende, Darmstadt 1822, 4 {4}
- [Weber G. 1835] Gottfried Weber, Akustik, in *Encyclopädie der gesammten musikalischen Wissenschaften oder Universal-Lexicon der Tonkunst*, hg. Gustav Schilling Bd. 1, Stuttgart 1835, 99-119 {4}
- [Wever et al. 1938] Ernest Glen Wever, Charles W. Bray: Distortion in the ear as shown by the electrical responses of the cochlea, *JASA* 9, 1938, 227-233 {7, P}
- [Wever et al. 1948] Ernest Glen Wever, Merle Lawrence, The patterns of response in the cochlea, *JASA* 21, 1949, 127-134 {P}
- [Willis 1832] Robert Willis, Ueber Vocaltöne und Zungenpfeifen, *Poggendorfs Annalen*, 24, 1832, 397–437 {4}
- [Winckel 1952] Fritz Winckel, Über das Farbspektrum der Musik, in *Melos* 1952, p. 135 {A}
- [Wogram 1988] Klaus Wogram: Die Bedeutung nicht-stationärer Schwingungsvorgänge für die Bewertung von Musikinstrumenten. In: *Qualitätsaspekte* (1988), 23–34 {6, 8}
- [Wupper 1989] Horst Wupper: Einführung in die digitale Signalverarbeitung, Hüttig, Heidelberg 1989 {8}
- [Wymersch 1999] Brigitte van Wymersch: *Descartes et l'évolution de l'esthétique musicale*, Mardaga, Sprimont 1999 {2}

[Y]

- [Young 1800] Thomas Young, Outline of experiments and inquiries respecting sound and light, *Phil. Trans. Roy. Soc. London* 1, 1800, 106 {4}

[Z]

- [Zielinski 1966] Tadeus Zielinski, Neue Klangästhetik, in *Melos* 1966, p. 210 {A}
- [Zwicker (ed) et al. 1974] Facts and models in hearing. Hg. E. Zwicker, E. Terhardt, *Kongressbericht*, Tutzing 1974, Springer, Heidelberg 1974 {P}
- [Zwicker et al. 1967] Eberhard Zwicker, Richard Feldtkeller, *Das Ohr als Nachrichtenempfänger*, S. Hirzel Verlag, Stuttgart 1967 {A}

Periodika

- Acustica* *Acustica*, Journal international d'acoustique, BS Medizinbibliothek in Kantonsspital Nat Zs 1336 / älter als 10 Jahre: Zeitschriftenmagazin
- JASA* *Journal of the Acoustical Society of America*, BS Medizinbibliothek in Kantonsspital Med Zs 2526 / UB geschlossene Abt. ab Vol 19, 1947. (älter als 10 Jahre) Vol 1, 1929 - Vol 16, 1945: CD-ROM Sh 29
- Poggendorfs Annalen* *Poggendorfs Annalen der Physik und Chemie*, BS UB Nat Zs 157

Personenverzeichnis

[A]

Adelung 174, 175, 176, 228, 367, 368, 369
 Andersch 222, 229–231, 367, 368
 Aristoteles 7, 10, 18, 21, 49, 54, 56, 62, 63, 83–85, 105, 155, 220, 366, 369, 377
 Aristoxenos 7, 17, 18, 147, 155, 198

[B]

Bacon 24, 60
 Bailhache 9, 19, 21, 39, 42, 73, 267, 276, 366, 368, 369
 Barkowsky 9, 295, 304, 367, 368, 369
 Barrow 32
 Baumann 11, 19
 Beasley 5, 305, 306, 367, 370
 Beeckman 3, 4, 45, 47–55, 57, 58, 60, 61, 63, 73, 77–79, 84, 87, 104–108, 112, 161, 163, 342, 364, 366, 369, 370, 386
 Békésy 9, 96, 181, 211, 243, 284, 345, 365, 366, 367, 370
 Benedini 328–330, 367, 370
 Bennett 11
 Berlioz 5, 169, 181, 182, 212, 220, 222, 231–237, 275, 316, 321, 367, 370, 379
 Bernoulli 4, 32, 35, 36, 37, 38, 41, 42, 43, 46, 88, 112, 115, 120, 135–141, 149, 159, 174, 178, 184, 191, 213, 245, 256, 341, 348, 364, 367, 370, 374
 Bilsen 53, 62, 366, 367, 370, 371
 Boer 211, 309, 310, 367, 370, 376
 Boethius 7
 Brahe 24
 Brandt 5, 43, 47, 79, 89, 182, 220, 246–252, 256, 258, 348, 357, 366, 367, 369, 370
 Brossard 122, 164, 367, 368, 371
 Brunelleschi 71

[C]

Cagniard de la Tour 367, 371
 Cannon 9, 10, 33, 38, 39, 112, 113, 115, 116, 135, 138, 178, 366, 367, 371, 373
 Capellen 244, 367, 371
 Cauchy 33
 Cernuschi 11, 164, 367, 371
 Chion 317, 368, 371
 Chladni 4, 5, 9, 112, 120, 152, 153, 178, 179, 183–185, 220, 228–231, 262, 270, 367, 371, 372, 386
 Chocholle 5, 305, 308, 367, 372
 Chowning 5, 231, 331, 332, 368, 372
 Craig 5, 311, 337, 344, 368, 372

[D]

d'Alembert 135
 d'Souza 11
 Dahlhaus 48, 367, 368, 372
 de la Vallée-Poussin 339
 Demokrit 59, 63, 86
 Descartes 3, 4, 13, 19, 20, 22, 24, 25, 26, 27, 29, 31, 33, 34, 39, 45, 46, 47, 51–55, 58, 60–63, 68–73, 77, 80–84, 88, 89, 92, 104, 106–108, 111, 114, 120–123, 150, 179, 286, 324, 367, 369, 372, 373, 382, 387
 Dickreiter 98, 216, 219, 367, 368, 373
 Diderot 4, 42, 88, 116, 147–150, 153, 156, 157, 159, 163, 167, 168, 367, 371, 373, 379
 Dirichlet 8, 37, 280, 340, 364
 Drobisch 241, 242
 du Bois-Reymond 239, 241, 247, 276, 376, 377
 Duclos 170

[E]

Ebeling 28, 322, 368, 373
 Eckel 227, 367, 373
 Engfer 30, 31, 71, 366, 367, 373
 Epikur 59
 Erard 212, 235, 236
 Erxleben 4, 49, 152, 153, 163, 185, 367, 373
 Euklid 3, 12, 13, 17, 18, 49, 147, 352, 364
 Euler 4, 8, 32, 36–38, 41–44, 46, 79, 88, 112, 115, 116, 134, 135, 137–140, 148, 149, 159–163, 168, 171–174, 178, 184, 200, 211, 213–215, 243, 256, 319, 339, 341, 344, 352, 364, 367, 374
 Everett 287

[F]

Fermat 30, 32
 Fleischer 264, 322, 367, 374
 Fletcher 266, 368, 374
 Fogliano 15, 18
 Fourier 3, 6, 8, 37, 43–44, 115, 140, 174, 180, 184, 187, 191, 196, 198, 214, 216, 219, 238, 245, 247, 254, 260, 263, 268, 270, 280, 283, 287, 298, 339, 340–342, 345, 348, 351, 364, 366, 367–371, 374, 382
 Fraunhofer 241

[G]

Gabor 355
 Gage 220, 367, 368, 374
 Galilei 3, 13, 14, 15, 16, 17, 19, 366, 374
 Galileo 19, 30, 42, 58, 62, 71, 113, 366, 374
 Gibbs 139, 341
 Goethe 10, 174, 377
 Grey 5, 36, 167, 182, 231, 325–329, 352, 353, 365, 368, 375
 Groddeck 11, 112, 367, 375

[H]

Hadamard 32
 Hällström 4, 180, 203–209, 367, 375
 Handschin 5, 85, 316, 323, 365, 367, 368, 375
 Hartley 241
 Hauer 5, 316, 321–323, 335, 368, 375
 Häusler 11
 Heine 174
 Heisenberg 349, 364
 Helferich 12, 58, 366, 375
 Helmholtz 4, 5, 9, 11, 37, 39, 42, 43, 47, 48, 55, 74, 76, 85, 89, 91, 97, 102–104, 112, 115, 131, 134, 140, 145, 155, 161, 171, 174, 179–183, 188, 209–211, 214, 215, 220–222, 231, 238–241, 243, 244–279, 280, 281, 283–295, 298–300, 305, 308, 316, 323, 328, 330, 331, 340, 344, 345, 348, 365, 366, 367, 368, 372, 375, 376, 377, 378, 380, 383, 384, 386, 387
 Herder 4, 174, 175, 177, 181, 182, 220, 228, 367, 376
 Hermann 180, 263, 280, 281, 291, 293, 300, 303, 304–305, 311, 314, 337, 344, 348, 367, 372, 376
 Hesse 9, 79, 322, 367, 368, 376, 383
 Hine 131, 133, 156, 367, 376
 Hire 4, 118–120, 153, 183, 367, 376
 Hoffmann 174, 182, 221, 227, 380
 Houtsma 171, 368, 376
 Hunziker 11
 Huygens 42, 51, 59, 73

[J]

Jaucourt 47, 165, 367, 377
 Jean Paul 5, 12, 13, 135, 174, 182, 223–228, 367, 377
 Jewansky 10, 222, 367, 368, 377
 Jost 175, 181, 228, 367
 Jost E. 368, 377

[K]

Kafker 165, 367, 377
 Kandinsky⁸
 Käuser 227, 367, 377
 Kempelen 101, 219, 220, 367, 377
 Kepler 24, 25
 Kirsten 239, 247, 276, 367, 376, 377
 Koch 4, 5, 48, 74, 162, 183, 185–187, 222, 223, 230, 255, 298, 367, 377
 Kock 351, 368, 378
 Koenig 5, 31, 43, 86, 118, 162, 243, 263, 281, 287, 289, 290–304, 312, 337, 344, 348, 365, 367, 378, 386
 Kopernikus 24, 25
 Krämer 18, 31, 69–71, 366, 378
 Kratzenstein 101, 367, 378
 Krüger 181
 Kuile, ter 5, 231, 287, 304–306, 344, 367, 378

[L]

Lagrange 26, 200, 368, 378
 Langner 365, 367, 368, 378
 Lehrdahl 6, 181, 182, 317, 328, 331, 333–335, 368, 377, 378
 Leibniz 3, 21, 22, 27, 32, 34, 35, 36, 138, 143, 147, 226, 342, 365, 378
 Leisinger 22, 23, 138, 143, 147, 366, 367, 378
 Leonardo da Vinci 16, 55
 Lichtenhahn 1, 11, 101, 165, 168, 221, 224, 367, 379, 381
 Licklider 324, 367, 368, 379
 Lindsay 9, 43, 58, 368, 379
 Ludwig 68, 367, 379

[M]

Macdonald 231, 367, 370, 379
 Maehder 221, 224, 367, 379
 Mahoney 366, 367, 379
 Mairan 4, 57, 58, 60, 62, 79, 97, 112, 116, 120, 128, 130, 131, 133–135, 149, 153, 155–157, 159, 160, 163, 181, 182, 201, 211, 254, 284, 348, 365, 367, 376, 379
 Martin 11
 Mattheson 4, 7, 22, 49, 115, 116, 145–147, 177, 236, 365, 367, 380
 Mayer 277, 367, 368, 380
 Mazzola 21, 318, 322, 323, 333, 335, 368, 380
 Mc Adams 11, 317, 368, 380, 382
 Meier 318, 368, 379, 380
 Mersenne 3, 4, 6, 7, 8, 16, 21, 26, 33, 36, 42, 45–47, 49, 51–53, 55–57, 59–63, 67–68, 73, 77, 79, 82–92, 101–112, 115, 123, 132, 144, 148, 162, 177, 187, 226, 228, 244, 249, 278, 316, 341, 361, 364, 367, 369, 375, 378, 379, 380
 Meyer 308
 Meyer-
 Eppler 335, 355, 368, 380
 Meyering 181, 238, 367, 380
 Mol 215, 219, 367, 368, 380
 Muzzulini 239, 277, 329, 335, 339, 367, 380
 Myschkis 298, 343, 368, 381

[N]

Newton 8, 27, 30, 31, 32, 35, 36, 46, 59, 73, 114, 116, 163, 182, 242, 365
 Nitsche 315, 367, 381

[O]

Ohm 4–6, 9, 43, 47, 95, 112, 115, 136, 140, 180, 187–200, 208–211, 219, 234, 235, 244–247, 251, 252, 256–257, 265, 280–282, 289, 294, 340, 344–345, 348, 358, 364–365, 367, 381, 386

[P]

Palisca 14, 15, 18, 19, 366, 381
 Pfeiffer 12, 19, 24, 25, 26, 32, 33, 135, 366, 368, 381
 Pierce 181, 193, 266, 367, 368, 381
 Pinkus 341, 368, 382
 Plomp 5, 31, 182, 303, 304, 312, 328, 329, 336, 337, 367, 368, 382
 Poisson 3, 45, 57, 58, 73, 88, 367, 372, 373, 382
 Popper 31
 Praetorius 3, 4, 7, 45, 46, 47, 49–52, 63–68, 73–77, 80, 89–92, 101–104, 109, 127, 133, 214, 220, 225, 228, 278, 353, 367, 375, 382
 Pressnitzer 5, 313–314, 344, 367, 368, 382
 Pythagoras 3, 12, 17, 49, 324, 339, 340, 352, 364

[Q]

Quintilian 147

[R]

Rameau 4, 22, 47, 79, 85, 88, 112, 115, 120–133, 135, 145, 149, 157, 163, 177, 178, 184, 319, 365, 367, 372, 375, 382
 Rayleigh 287, 368, 382
 Reuter 182, 330, 368, 382
 Riemann 73, 368, 382, 383
 Risset 101, 231, 260, 367, 368, 383
 Ritsma 5, 195, 243, 308, 367, 383, 384
 Rivinus 57
 Robinson 217
 Romieu 200, 305
 Rousseau 4, 11, 49, 79, 92, 112, 115, 116, 128, 131, 150–153, 158–159, 162–171, 175, 244, 278, 316, 366, 367, 371, 383

[S]

Sandell 10, 318, 367, 368, 383
 Savart 190, 217, 249
 Schläpfer 335, 367, 368, 383
 Schneider 227, 367, 368, 373, 377, 378, 383, 385
 Schönberg 5, 34, 233, 244, 280, 316, 318, 319, 320, 321, 365, 368, 372, 384
 Schouten 5, 180, 243, 282, 307, 308, 309, 344, 347, 365, 367, 368, 384
 Schulisch 181, 238, 367, 384
 Schumann 273, 331, 368, 384
 Seebeck 3, 4, 5, 9, 43, 44, 45, 47, 112, 115, 140, 180, 182, 187–200, 208, 209, 234, 235, 245–247, 251, 252, 256, 260, 263, 265, 280, 281, 282, 298, 340, 344, 348, 358, 364, 365, 367, 384, 386
 Smith 4, 42, 49, 140–143, 153, 155, 160–161, 200–202, 246, 289, 310, 339, 342, 348, 364, 367, 368, 385
 Sorge 344, 367, 385
 Spaten 177, 367, 368, 385
 Stevin 13, 19
 Stewart 351, 368, 385
 Sulzer 4, 153, 161, 162, 163, 177, 222, 367, 385

[T]

Tartini 4, 22, 115, 116, 143–145, 147, 168, 200, 305, 344, 365, 367, 385
 Taylor 88, 116, 135, 138, 142, 191
 Terhardt 365, 368, 385, 386, 387
 Thies 167, 316, 368, 386
 Thomson 5, 243, 246, 280, 281, 286–290, 304, 305, 310, 339, 342, 348, 364, 367, 386
 Tieck 174, 224, 227, 373
 Toeplitz 41

[U]

Ullmann 9, 101, 367, 386
 Unger 238, 241, 375

[V]

Verney 3, 45, 46, 89, 96–97, 134, 348, 367, 386
Viète 25, 33
Voigt 368, 386

[W]

Waard 49, 106, 367, 370, 386
Walker 354, 355, 368, 386
Wallis 3, 32, 45, 92, 94, 95, 153, 263, 367, 386
Warren 55, 181, 255, 367, 368, 387
Weber G. 4, 181, 222, 228–229, 367, 387
Weber W. 4, 205, 207, 211–214, 367, 387
Willis 5, 112, 211, 214–220, 247, 249, 278, 283, 344, 367, 387
Winslow 57
Wood 311
Wymeersch 14, 16, 18, 19, 24, 366, 367

[Y]

Young 4, 8, 36, 37, 39, 41, 49, 140, 187, 200–203, 207, 221, 238, 263, 272, 276, 296, 305, 365, 367, 387

[Z]

Zabarella 24, 30
Zarlino 13–17, 20, 75, 120, 374
Zwicker 326, 331, 368, 387

Sachindex

[A]

- Amplitude 6, 37–41, 43, 136, 140, 141, 150, 159, 180, 189, 192, 193, 195, 196, 199, 210, 220, 246, 251, 252, 254, 257, 261, 265, 268, 269, 270, 276, 281, 283, 285–287, 290, 292, 295, 298, 300, 302–304, 306, 307, 308, 311, 312, 314, 322, 325, 326, 328, 330, 331, 336, 337, 340–343, 346, 348, 353, 355, 357, 360, 366, 370
- Amplitudenmodulation 103, 171, 246, 308, 331, 333
- Amplitudenspektrum 6, 43, 195, 246, 252, 254, 257, 261, 265, 268, 269, 270, 283, 290, 302, 304, 311, 314, 326, 331, 337, 342, 353, 357, 366, 370
- Anfangsauslenkung 36, 42, 79, 113, 114, 137, 141, 142, 249, 250, 341
- aperiodisch 157
- Approximation 18, 19, 37, 187, 205, 352
- Auslöschung 40, 129, 189, 283, 294, 300, 307

[B]

- Bandbreite, kritische 202, 241, 293, 308, 311, 315, 328
- Bandpassfilter 92, 182, 240, 329, 330, 346
- Bark 327
- Basilarmembran 96, 97, 178, 179, 180–182, 202, 210, 211, 243–259, 261, 262, 269, 275, 276, 281, 282, 284, 286, 292, 294, 306, 307, 309, 311, 326–330, 344–348, 364, 365
- Basis 10, 19, 24, 25, 33, 35, 36, 116, 121, 140, 141, 147, 156, 171, 183, 221, 243, 245, 246, 259, 263, 276, 277, 288, 304, 316, 318, 324, 353, 364
- bruit 10, 21, 53, 108, 110, 124, 151, 157, 158, 159, 232, 237, 362

[C]

- Cochlea 10, 46, 89, 96, 181, 211, 244, 254, 299
- corps sonore 118, 119, 120, 125, 126, 131, 133–135, 148, 163, 167, 232

[D]

- Dämpfung 119, 129, 212, 261, 270, 285, 296
- Differenzialgleichung 3, 24, 364
- differenzierbar 40, 41
- Differenzierbarkeit 8, 139
- differenzieren 319, 331
- Differenzton 115, 180, 201, 206, 208–211, 265, 290, 292–294, 304, 305, 308–310, 344, 345
- Dimension 3, 5, 29, 33, 51, 63–65, 68, 71–73, 76, 77, 80, 110, 111, 153, 167, 215, 286, 317, 318–326, 328–331, 333, 361
- diskret 12, 20, 49, 65, 66, 79, 89, 138, 159, 332, 339, 345, 346, 351, 352, 364
- Diskretisierung 328, 333, 339, 342, 352
- Dreiecksschwingung 26, 37, 41, 42, 139, 149, 187, 202, 203, 296, 315, 341

[E]

- Eigenfrequenz 58, 98, 99, 113, 118, 120, 128, 130, 178, 183, 216, 217, 218, 253, 254, 263, 272, 297, 298, 306, 347
- Einschwingvorgang 91, 113, 215, 260, 382

[F]

- Fadenpendel 263
- Farbe 5, 8, 9, 10, 13, 73, 77, 133, 134, 156, 163, 174–176, 179, 182, 183, 220–223, 229, 238–240, 268, 319–321, 323, 365, 366, 374, 377
- Farbenklavier 181, 222, 223
- Farbton 9, 239, 240
- Filter 253, 314, 346, 347
- Filterbank 182, 330, 346, 348
- FM-Synthese 318, 333
- Formant 38, 89, 92, 99, 112, 173, 214, 216, 217, 220, 255, 273, 275, 283, 302, 321, 331

- Fourier, Theorem von 3, 6, 8, 37, 43, 180, 184, 191, 214, 245, 254, 263, 270, 298, 339, 340, 342, 345, 348, 364
- Fourieranalyse 6, 43, 44, 173, 199, 244, 245, 249, 252, 258, 259, 260, 262, 265, 281, 295, 297, 309, 341, 342, 348, 349, 350, 355
- Fouriersynthese 31, 263, 304, 318, 341, 348
- Fouriertransformation 6, 35, 54, 339, 345, 348, 349, 350, 351, 352, 365
- Freiheitsgrad 33, 35, 112–115, 141
- Frequenzmodulation 5, 171, 246, 309, 314, 318, 331, 332, 333
- Fundamentalbass 107, 112, 115, 129

[G]

- Gehörphysiologie 258
- Geräusch 4, 53, 110, 153, 156–163, 174, 175, 187, 217, 229, 274, 362
- Grundfrequenz 47, 78, 83, 114, 119, 125, 144, 159, 162, 178, 184, 191, 197, 198, 217, 218, 253, 258, 267, 269, 270, 273, 274, 281–283, 292, 297–299, 309, 321, 331, 345, 347, 348, 352, 353, 358, 360
- Grundton 44, 81, 88, 92, 99, 117, 120, 125, 126, 129, 131, 135, 136, 152, 154, 161, 177, 183, 184, 214, 235, 243, 249–256, 260, 265, 267–274, 277, 287, 290, 296, 303, 304, 310, 319, 321, 322, 336, 337, 345

[H]

- Harmonie 8, 14, 34, 45, 53, 64, 73, 108, 120, 121, 125, 126, 127, 131, 143, 178, 179, 184, 203, 223, 230–232, 238, 241, 269, 277, 286–289, 371, 376, 378, 380
- Helligkeit 9, 34, 77, 165, 170, 175, 182, 239, 240, 323, 325, 330, 331, 333, 334, 335
- Helmholtz-Koordinaten 239, 240, 316
- higher order beats 308
- Hörschwelle 194, 195, 306
- Hüllkurve 218, 246, 276, 284, 293, 295, 305, 307, 308, 311, 313–315, 332, 333, 336, 351, 355

[I]

- ictus 3, 48, 49, 53–55, 60, 106, 162, 171–173
- ideale Saite 35, 100
- Impulsfunktion 6, 37, 43, 112, 113, 131, 162, 173, 188, 192, 198, 252, 281–283, 358
- Impulsmuster 47, 78, 81, 105, 106, 339
- Induktion 24, 27, 29, 30, 31
- Informationstheorie 335, 380
- inharmonisch 134, 177, 262, 298, 332, 343, 364
- Inharmonizität 84, 91, 333, 334
- Instrumentationslehre 169, 231, 370
- Integral 32, 159, 339, 340, 382
- Integration 26, 32, 33, 36, 39, 145, 163, 187, 301, 329, 330, 341, 343, 364
- integrieren 89
- Intensität 20, 34, 81, 193, 239, 247, 248, 251, 252, 266, 293–297, 302, 303, 327, 331, 353, 365
- Interferenz 217, 238, 296, 300, 332, 345
- Interpolation 339, 348, 364
- Isochronismus 113, 116, 148–151, 168, 189, 245
- Isochronizität 42, 88, 141, 148–151, 153, 157, 187
- Isophonen 266

[K]

- Katachrese 112, 165
- Kennzahl 44, 323, 326–332, 348, 355
- Kerbung 366
- Klanganalyse 266
- Klangcharakter 43, 50, 76, 83, 95
- Klangfarbenanalogien 380
- Klangfarbengesetze, Schumannsche 331, 380
- Klangfarbenmelodie 5, 181, 222, 233, 244, 316–318, 321, 322, 328, 334, 372, 380, 383

Klangfiguren 120, 179, 270
 Klangraum 316, 333
 Klangspaltung 379
 Klangsynthese 7, 81, 125, 132
 Klassifikation 12, 51, 76, 89, 176, 231, 259, 332
 Koinzidenztheorie 45, 47, 73, 78, 81, 102, 107, 342
 Kombinationston 4, 10, 180, 203, 204, 206–210, 280, 281, 293, 294, 304, 307, 344, 386
 komplexe Zahl 98, 328
 Kompositum 175, 176, 177, 182, 220
 Konsonanz 4, 13, 14, 15, 17, 18, 45, 73, 76, 78, 80, 81, 94, 101, 102, 104–106, 108, 119, 123–126, 155, 161, 277, 278, 317, 334, 342, 381
 kontinuierlich 41, 49, 329, 346, 352
 Koordinaten 27, 34, 66, 68, 114, 143, 324, 327, 329, 342
 Koordinatensystem 23, 25, 27, 324, 325, 328, 341, 354, 364
 Korpuskeltheorie 34, 46, 63, 79, 134, 156
 kritische Bandbreite 241, 304, 327
 kritisches Band 315, 329
 Kunstwort 8, 181

[L]

Laut 74, 91, 145, 146, 159, 176, 186, 228–230, 301
 Lautheit 103, 171, 193, 266–268, 301, 304, 311, 322
 Lautstärke 4, 5, 8, 34, 51, 66–77, 98, 109, 116, 140, 141, 147–152, 157, 159, 167, 168, 171, 172, 178, 187, 190, 193, 204, 211, 215, 241, 260, 266, 267, 284, 288, 301, 307–309, 317, 326–331, 333, 337, 365
 Licht 3, 8, 9, 26, 46, 54, 56, 58, 59, 61, 69, 72, 73, 79, 81, 133, 134, 148, 153, 156, 163, 174, 221, 224, 226, 238, 239, 268, 275, 364, 366
 Lochsirene 187, 188, 190, 193, 198, 281, 304

[M]

Metamerie 239
 Metapher 34, 57, 63, 68, 70, 71, 115, 124, 134, 165, 179, 185, 243, 254, 284, 321, 365, 366
 Metrik 41, 280, 324
 Mixtur 47, 74, 76, 161, 235
 Modulationsfrequenz 306, 308, 310, 331, 332, 333
 Monade 3, 21, 22, 23, 34, 143, 147, 342, 365
 Monochord 51, 52, 80, 90, 100, 120, 143

[N]

Natur 8, 14–17, 23, 30, 34, 35, 48, 50–52, 56, 59, 60, 62, 64, 68, 71, 72, 74, 76, 88, 89, 97, 100, 101, 112, 113, 125, 127, 133, 138, 139, 145, 152, 157, 158, 170, 171, 190, 191, 205, 210, 211, 213, 217, 223, 233, 280, 333, 338, 339, 348, 363, 365, 386
 Nichtlinearität 53
 Nonnengeige 116, 119, 120, 144

[O]

Oberton 74, 75, 81–83, 95, 99, 130, 131, 256, 259, 265, 277, 292, 296, 305, 307, 321, 322, 337
 Oberton, subjektiver 381
 Objektwerdung 32, 36, 366
 Optik 147, 182, 238, 245, 316, 375, 376, 381
 Orgelmixtur 65
 Ortstheorie 58, 89, 97, 131, 147, 202, 243, 263, 270, 283, 284, 285, 293, 307, 309, 343, 344

[P]

Paarvergleich 324
 Paradigma 24, 35, 48, 68, 89, 104, 137, 191, 211, 243, 290, 318
 Partialtonschwebung 104, 155, 161, 289
 Pendel 51, 115, 141

Periodikton 107, 180, 195, 201, 205, 210, 243, 245, 262, 278, 281, 282, 290, 294, 308, 309, 310, 344, 365
 periodisch 38, 40, 113, 129, 141, 194, 199, 213, 217, 229, 245–247, 251, 257, 262, 269, 284, 288, 291, 293–298, 305, 342, 348, 349, 351, 357
 Phasenfrage 5, 243, 280–284, 297, 299, 300, 303, 312, 367
 Phasengang 312, 338
 Phasenspektrum 312
 pitch shift-Effekt 310
 Polarkoordinaten 35, 336
 Psychoakustik 7, 9, 11, 51, 244, 316, 317, 324, 365, 368, 369, 381
 Purpurlinie 240, 242, 330

[Q]

Qualität 33, 34, 47, 56, 64, 67, 89, 90, 95, 109, 116, 160, 164, 167, 168, 169, 171, 172, 200, 214, 221, 224, 228, 229, 286–289, 302, 304, 362, 363, 371, 375
 Quantität 47, 64, 67, 109, 154, 224, 228, 361
 quasiperiodisch 6, 298, 328, 339, 342, 343, 348, 359, 360, 364, 365
 Quintparallelen 65

[R]

Rauigkeit 4, 34, 101, 104, 110, 268, 273, 275–277, 284, 285, 292, 313, 314, 329, 331, 333, 348, 362, 363
 Raumakustik 264, 283
 Rauschen 159, 330
 Rechtecksschwingung 41, 42, 341
 Redundanz 11
 Reflexion 73, 99, 202, 379
 Register 75, 99, 132, 144, 145, 152, 160, 161, 167, 169, 221, 230, 233, 248, 278
 Registrierung 78, 100, 125, 233
 Residualton 180, 243, 265, 280, 294, 295, 304, 307, 309, 344, 345, 365
 Residuum 309, 344
 Resonanz 3, 46, 89–92, 95, 97, 99–101, 124, 127–132, 135, 148, 158, 159, 165, 187, 210, 212, 216, 234, 235, 254, 261, 272, 274, 284, 366
 Resonanzkurve 329

[S]

Sägezahnschwingung 91, 208, 272, 303, 314
 Saitengleichung 4, 42, 137
 Saitenschwingung 42, 79, 86, 90, 113, 114, 115, 328
 Sättigung 239, 240, 323
 Schalldruckverlauf 43, 129, 163, 179, 269, 280–282, 286, 298, 299, 301, 305, 344
 schallend 147, 153, 163
 Schärfe 253, 272, 278, 281, 301, 309, 327, 330
 Schwebung 4, 9, 37, 47, 49, 79, 88, 89, 101–104, 153–155, 160, 161, 180, 200–202, 208–210, 239, 241, 246, 269, 273–277, 280, 283, 284, 289–297, 304–309, 329, 342, 348
 Schwebungsfrequenz 21, 155, 202, 306
 Schwingungsform 43, 81, 129, 159, 173, 174, 182, 188, 190, 194, 199, 201, 202, 209, 245, 247–249, 252, 253, 256–258, 263, 267, 272, 280, 287, 289, 294, 296–299, 301, 306, 345, 381
 Schwingungsknoten 3, 86, 92, 112, 116, 117, 153, 183, 214
 Schwingungslehre 3, 9, 10, 35, 112
 Schwingungsmode 35, 115, 120, 138, 178, 210
 Signalverlauf 44, 172, 181, 198, 282, 283, 306, 343, 344, 348
 Sinusschwingung 3, 12, 26, 33, 37–43, 113, 115, 116, 135, 136, 138, 140, 142, 149, 159, 162, 187, 189, 191, 192, 196, 202, 208, 219, 220, 246, 255, 256, 262, 263, 283, 286, 292, 301, 329, 341, 351, 355, 364
 Sinuston 4, 37, 43, 46, 49, 135, 182, 190, 193, 200, 202, 241, 246, 251, 253, 261, 262, 263, 266, 268, 276, 277, 281–283, 286, 287, 289, 291, 292, 296, 297, 299, 301, 304, 306, 307–309, 311, 329, 332, 336, 342, 365
 Sirene 180, 188–190, 194, 198, 200, 210, 251, 252, 300, 381, 384
 Sirene optische 243

- Sirenensynthesizer 300
 Skalierung, multidimensionale son 317, 324–326, 335, 338
 10, 21, 48, 52–58, 62, 82, 83, 84, 86–88, 90, 91, 98, 99, 104, 108, 110, 118, 122, 124, 126, 133, 135, 136, 138, 139, 140, 141, 147, 148–151, 153, 157, 158, 159, 164, 171, 172, 233, 234, 235, 237, 362, 370, 371, 374, 378, 383
 sonorité 232–235, 237
 sound 55, 94, 116, 141, 221, 286–289, 379, 382, 383, 387
 Spektralanalyse 6, 181, 200, 243, 266, 339, 345, 351, 368
 Spektraldynamik 5, 230, 243, 270, 278, 279, 318, 327, 331, 351, 364
 Spektralvektor 301, 324, 329, 342
 Spektrum 112, 125, 127, 130, 159, 163, 171, 173, 178, 199, 210, 218, 239, 248, 260, 261, 263, 265, 267, 268, 270–275, 277, 278, 281–283, 285, 297, 302, 321, 326, 330–332, 339, 343, 344, 345, 348, 349, 351, 358–360, 381, 384
 Sprechmaschine 101
 stationär 285
 stetig 23, 41, 79, 89, 141, 213, 270
 Stetigkeit 8, 191
 Stimmung 13, 18–20, 51, 66, 130, 160, 274, 289, 290, 385
 Superposition 4, 29, 35, 36, 38, 39, 87, 99, 115, 116, 126, 128, 132, 135, 138, 153, 162, 163, 178, 184, 189, 192, 200, 201, 204, 211, 214, 263, 281, 286, 289, 291, 300, 331, 341, 342, 344, 346, 348
 sursolide 29, 34
 symbolische Differenz 18
 Symmetrie 21
 Synästhesie 8, 10, 227

[T]

- Teiltonphasen 253, 264, 285, 290, 300, 314, 328
 Terzsieboszillogramm 346
 Testsignal 355
 timbre 8, 9, 10, 11, 47, 109, 112, 116, 148, 151, 152, 164–168, 170, 175, 177, 181, 211, 212, 213, 220–222, 228, 230, 233–237, 260, 309, 316, 317, 324, 327, 335, 366, 369–371, 374, 375, 380–384, 386, 387
 Toncharakter 323, 375
 Tonfarbe 4, 5, 174, 175, 176, 181, 220, 228
 Tonigkeit 9, 161, 177, 319
 Tonklang 234, 236
 Ton-Klang 4, 7, 145, 146, 147, 365
 Träger 52, 99, 120, 126, 131, 201, 224, 246, 247, 330–333, 345, 351, 354, 355
 Trägerfrequenz 199, 309, 310, 314, 331, 332
 Trommelfell 43, 45, 46, 54, 56, 57, 72, 78, 86, 124, 125, 131, 132, 147–149, 153, 244, 281, 286, 294, 296, 299, 344

[U]

- Ultraschall 195
 Unendliche 27, 31, 110, 137, 144, 224, 225, 345, 362
 Unendlichkeit 3, 27, 31, 32, 138, 224
 Universalien 316
 universelle Harmonie 3, 24, 35, 45, 354, 365, 366
 Unschärferelation 79, 246, 349, 351, 364

[V]

- Vektorraum 25, 29, 46, 114, 328, 329, 332, 341, 350
 Verdeckung 125, 241, 309
 Verschmelzung 13, 17, 73, 75, 104, 108, 125, 132, 144, 183, 203, 265, 378
 Vibration 90, 97, 113, 116, 137, 141, 201, 382
 Vibrationsmikroskop 47, 272, 280
 Vibrato 4, 150, 169, 170, 171, 331, 333, 334

Vokal 4, 38, 47, 98, 101, 112, 116, 171–173, 175, 211, 214–217, 219, 220, 243, 247, 255, 256, 264, 273, 304, 331, 334, 366, 385
Volumen 70, 78, 168

[W]

Wahrnehmungsparameter 34
Wahrnehmungsschwelle 44, 224
Wavelet 354, 355, 382
Wavelettransformation 6, 354
Wellenlehre 30, 60, 73, 108, 133

[Z]

Zeitfunktion 37, 63, 172, 218, 260, 279, 283, 293, 295, 298, 342, 348–351, 359, 360, 384
Zeitsignal 272, 284, 308, 337, 340, 346, 348–350, 351
Zeittheorie 5, 37, 38, 43, 44, 116, 173, 180, 243, 309
zyklisch 192, 221, 306, 322, 335
Zykloidenpendel 35, 42

Abbildungsnachweise

Die nicht aufgeführten Illustrationen stammen vom Autor.

- | | | |
|---------|--------------------------------|---|
| 20 | [Descartes 1619 ²] | Renatus Descartes, <i>Musicae Compendium</i> / Leitfaden der Musik, Herausgegeben, ins Deutsche übertragen und mit Anmerkungen versehen von Johannes Brockt, lateinischer Text nach Amsterdam 1656, Wissenschaftliche Buchgesellschaft Darmstadt, 1978. Abb. S. 4. |
| 28 | [Ebeling 1999, 91] | Martin Ebeling, Tonhöhe physikalisch – musikalisch – psychologisch – mathematisch, <i>Systematische Musikwissenschaft</i> Bd. 2, hg. Jobst P. Fricke, Peter Lang, Frankfurt a. M. 1999. Die Abbildung stammt aus: Wilhelm Opelt, <i>Ueber die Natur der Musik</i> (1834) |
| 36 | [Young 1800] | Thomas Young, <i>Outline of experiments and inquiries respecting sound and light</i> , <i>Phil. Trans. Roy. Soc. London</i> 1, 1800, 106ff Plate 6 (S. 149) |
| 38 | [Cannon et al. 1981] | John T. Cannon, Sigalia Dostrovsky: <i>The evolution of dynamics: vibration theory from 1687 to 1742</i> (<i>Studies in the history of mathematics and physical sciences</i> 6), Springer, New York 1981. Fig. 1.1: S. 3. Mit freundlicher Genehmigung des Springer-Verlags © und der Autoren. |
| 39 | [Helmholtz 1863] | Hermann von Helmholtz, <i>Die Lehre von den Tonempfindungen als physiologische Grundlage für die Theorie der Musik</i> , Vieweg, Braunschweig 1863. S. 35 |
| 39 | [Bailhache 2001] | Patrice Bailhache, <i>Une histoire de l'acoustique musicale</i> , CNRS Éditions, Paris 2001, S. 146, Mit freundlicher Genehmigung der CNRS Éditions ©, Paris |
| 82 | [Descartes A.T. 1] | Charles Adam, Paul Tannery (ed), <i>Oeuvres de Descartes</i> , L. Cerf, Paris 1897-1913. Vol. I (1897): <i>Correspondance, 1622-1638, Briefe an Mersenne</i> , 22.7.1633, S. 268 / Nov 1633, S. 272 |
| 121 | [Rameau 1722] | Traité de l'harmonie réduite à ses principes naturels, 1722, Jean-Philippe Rameau, <i>Complete Theoretical Writings</i> , hg. Erwin Jacobi, Vol. 1, American Institute of Musicology, 1967. Abb. S. 4 (=34). |
| 132 | [Rameau 1737] | Génération harmonique, 1737, Jean-Philippe Rameau, <i>Complete Theoretical Writings</i> , hg. Erwin Jacobi, Vol. 3, American Institute of Musicology, 1967. Abb. S. 14 (=21). |
| 137 | [Euler 1748] | Leonhard Euler, <i>Sur la vibration des cordes</i> , 1748, <i>Opera Omnia</i> , Serie 2, Vol. 10, 1947, 63–77. Abb. 3: S. 73. Mit freundlicher Genehmigung des Birkhäuser-Verlags ©, Basel |
| 142 | [Smith 1749] | <i>Harmonics, or the philosophy of musical sounds</i> , Cambridge 1749, S. 258 nachgezeichnet |
| 162 | [Sulzer 1774] | Johann Georg Sulzer, <i>Allgemeine Theorie der Schönen Künste</i> , Leipzig 1771/1774, Digitale Bibliothek Band 67, Directmedia, Berlin 2002. Artikel Klang, 584–587. Abb. S. 586. Mit freundlicher Genehmigung der Directmedia, Publishing GmbH ©, Berlin. |
| 171 | [Euler 1765] | Leonhard Euler, <i>Eclaircissements plus détaillés sur la génération et la propagation du son et sur la formation de l'écho</i> , (1765) 1767, <i>Opera Omnia</i> , Serie 3, Vol. 1, 1946, 540–567. Abb. 3: S. 553 Mit freundlicher Genehmigung des Birkhäuser-Verlags ©, Basel |
| 188 | [Helmholtz 1863] | Hermann von Helmholtz, <i>Die Lehre von den Tonempfindungen als physiologische Grundlage für die Theorie der Musik</i> , Vieweg, Braunschweig 1863. S. 21 |
| 197 | [Seebeck 1844a] | August Seebeck, <i>Ueber die Definition des Tones</i> , <i>Poggendorfs Annalen der Physik und Chemie</i> , Band LXIII 1844, 353–368. S. 354 |
| 202/203 | [Young 1800] | Thomas Young, <i>Outline of experiments and inquiries respecting sound and light</i> , <i>Phil. Trans. Roy. Soc. London</i> 1, 1800, 106ff. Plate 5, S. 150 |
| 206/207 | [Hällström 1832] | Gustav Gabriel Hällström, <i>Von den Combinationstönen</i> , <i>Poggendorfs Annalen</i> , 24, 1832, 438–467. S. 444/445 |
| 216 | [Willis 1832] | Robert Willis, <i>Ueber Vocaltöne und Zungenpfeifen</i> , <i>Poggendorfs Annalen</i> , 24, 1832, 397–437. Tafel IV |

- 219 [Dickreiter 1994] Michael Dickreiter, Musikinstrumente: moderne Instrumente, historische Instrumente, Klangakustik, Bärenreiter, Kassel, 4 Aufl. 1994. Abb. S. 203. Mit freundlicher Genehmigung des Bärenreiter-Verlags ©, Kassel
- 240 [Helmholtz 1867] Hermann von Helmholtz, Handbuch der physiologischen Optik, 1867, 2. Auflage Hamburg/Leipzig 1885, Fig. 146 S. 288 / Fig. 140 S. 291
- 246 [Mathes et al. 1947] R. C. Mathes, R. L. Miller, Phase Effects in Monaural Perception, JASA, Vol. 19.5, 1947, 780–797. Fig. 6: S. 786. Mit freundlicher Genehmigung durch The Journal of the Acoustical Society of America ©.
- 250 [Brandt 1855] Eduard Brandt, Ueber die Verschiedenheit des Klanges (Klangfarbe), Annalen der Physik und Chemie 112, 1861, 324–336. S. 333
- 260 [Le Timbre 1991] Le Timbre, Métaphore pour la Composition, IRCAM, hg. Christian Bourgois, 1991, Fig. 3: S. 108. Mit freundlicher Genehmigung durch Christian Bourgois Éditeur ©, Paris.
- 264 [Helmholtz 1863] Hermann von Helmholtz, Die Lehre von den Tonempfindungen als physiologische Grundlage für die Theorie der Musik, Vieweg, Braunschweig 1863. S. 184 / S. 186
- 266/267 [Pierce 1989] John R. Pierce, Klang, Musik mit den Ohren der Physik, 2. Aufl., Spektrum der Wissenschaften, Heidelberg 1989. S. 101. Erstmals publiziert in [Fletcher et al. 1933, 91]. Mit freundlicher Genehmigung der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft Heidelberg für die Verwendung der deutschen Beschriftung. Auf S. 267 Hintergrund für eigene Darstellung.
- 271 [Helmholtz 1863] Hermann von Helmholtz, Die Lehre von den Tonempfindungen als physiologische Grundlage für die Theorie der Musik, Vieweg, Braunschweig 1863. S. 135
- 276 [Bailhache 2001] Patrice Bailhache, Une histoire de l'acoustique musicale, CNRS Éditions, Paris 2001. Fig. 13: S. 173, Mit freundlicher Genehmigung der CNRS Éditions ©, Paris
- 298–303 [Koenig 1881a/b] Rudolph Koenig, Über den Ursprung der Stöße und Stoßtöne bei harmonischen Intervallen, Annalen der Physik 12, 1881, 335–349. Abb. S. 347, 348 / Bemerkungen über die Klangfarbe, Annalen der Physik und Chemie, 14, 1881, 369–393. Abb. S. 372, 380, 381, 383, 386
- 308 [Mathes et al. 1947] R. C. Mathes, R. L. Miller, Phase Effects in Monaural Perception, JASA, Vol. 19.5, 1947, 780–797. Fig. 13: S. 793. Mit freundlicher Genehmigung durch The Journal of the Acoustical Society of America ©.
- 311 [Craig et al. 1962] James H. Craig, Lloyd A. Jeffress, Effect of Phase on The Quality of a Two-Component Tone, JASA 34, 1962, 1752–1760, Fig. 1: S. 1753. Mit freundlicher Genehmigung durch The Journal of the Acoustical Society of America.
- 312 [Plomp et al. 1969] R. Plomp, H.J.M. Steeneken, Effect of phase on the timbre of complex tones, JASA Vol 46(2) 1969, 409–421. Fig. 1 S. 413. Mit freundlicher Genehmigung durch The Journal of the Acoustical Society of America ©
- 313/314 [Pressnitzer et al. 1999] Daniel Pressnitzer, Mc Adams, Stephen, Two phase effects in roughness perception, JASA 105 (5), 1999, 2773–2782. Fig 1: S. 2774 / Fig. 6: S. 2778, Fig 7: S. 2779. Mit freundlicher Genehmigung durch The Journal of the Acoustical Society of America © und durch Daniel Pressnitzer.
- 323 [Mazzola 1990] Guerino Mazzola: Geometrie der Töne, Elemente der Mathematischen Musiktheorie, Unter Mitarbeit von Daniel Muzzolini und einem Beitrag von Georg Rainer Hoffmann, Birkhäuser, Basel 1990, Abb. 42: S. 105. Mit freundlicher Genehmigung des Birkhäuser-Verlags ©, Basel
- 325 [Grey et al. 1978] John M. Grey, John W. Gordon, Perceptual effects of spectral modifications on musical timbres, JASA 63, 1978, 1495–1500. Fig. 2: S. 1496. Mit freundlicher Genehmigung durch The Journal of the Acoustical Society of America © und des Autors.
- 326 [Grey et al. 1978] John M. Grey, John W. Gordon, Perceptual effects of spectral modifications on musical timbres, JASA 63, 1978, 1495–1500. Fig. 4: S. 1497. Mit freundlicher Genehmigung durch The Journal of the Acoustical Society of America © und des Autors.

- 332 [Chowning 1973] John M. Chowning, The synthesis of complex audio spectra by means of frequency modulation, *Journal of the Audio Engineering Society*, 21, 1973, 526–534, Fig. 4: S. 528, Fig. 5: S. 529. Mit freundlicher Genehmigung der Audio Engineering Society ©, New York
- 334/335 [Lehrdahl 1987] Fred Lehrdahl, Timbral hierarchies, *Contemporary Music review*, 1987, Vol. 2, 135–160, Fig. 2: S. 139 / Fig. 13b: S. 153. Mit freundlicher Genehmigung der Taylor & Francis Group, www.tandf.co.uk/journals/titles/07494467.html
- 340 [Schouten 1940b] J. F. Schouten, Die Tonhöhenempfindung, *Philips' Technische Rundschau*. 5, 1940, 294–302. S. 300
- 341 [Pinkus et al. 1997] Allan Pinkus, Samy Zafrany, *Fourier Series and Integral Transforms*, Cambridge University Press, 1997, Fig. 2.3, 2.4 S. 70. Mit freundlicher Genehmigung der Cambridge University Press UK ©.
- 353 [Grey 1975] John M. Grey, An exploration of musical timbre using computer-based techniques for analysis, synthesis and perceptual scaling, PhD diss. Stanford University, Center for Computer Research in Music and Acoustics, Report No. STAN-M-2, 1975 (UMI 1987). Abb. S. 137, 138, 139. Mit freundlicher Genehmigung des Autors.
- 354/355 [Walker 1991] James S. Walker, *A Primer on Wavelets and their Scientific Applications*, Chapman & Hall/CRC: Boca Raton 1999. Abb. S. 131/135. Mit freundlicher Genehmigung der CRC Press © Boca Raton, Florida.

Lebenslauf Daniel Muzzulini

Geburtsdatum 27. 4 . 1958

Heimatort Zürich

Schule

1965–1971 Primarschule in Zürich

1971–1977 Realgymnasium Zürichberg, Matura Typus B

Studium

1977 – 1991 Studien an der Universität Zürich:

1984: Diplom Mathematik (Experimentalphysik, Musikwissenschaft)

1988: Diplom für das höhere Lehramt in Mathematik

1991: Lizentiat Musikwissenschaft (Philosophie)

1997 – 1998 Nachdiplomstudium Informatik Ingenieurschule beider Basel Muttenz (FHBB)

1998 – 2003 Doktorand in Musikwissenschaft, Universität Zürich

Berufliche Tätigkeit

2003 – anhin Dozent für Mathematik und Informatik, Teko Basel AG

2001 – 2002 Software-Ingenieur bei Byron Informatik AG Basel

1999 – 2001 Programmierer/Softwaretrainer bei Day Interactive AG in Basel

1998 Software-Entwickler bei Team Tangram AG in Basel

1992 – 1993 wissenschaftlicher Mitarbeiter an einem Nationalfondsprojekt im Bereich Musik,
Mathematik, Informatik an der Universität Zürich

1987 – 1989 Dozent Mathematik für EDV-Analytiker IMAKA Zürich

1985 – 1998 Lehrbeauftragter für Mathematik an verschiedenen Gymnasien in Zürich und Basel

1983 – 1992 Assistent am Seminar für angewandte Mathematik der ETH Zürich